清华大学优秀博士学位论文丛书



Tsinghua Theses

面向盲人触觉认知的触觉显示与体验研究

焦阳 著 Jiao Yang

Research on Tactile Display and User Experience by Haptic Perception for the Visually Impaired

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

面向盲人触觉认知的触觉显示与体验研究

焦　阳　著

清 华 大 学 出 版 社
北　京

内 容 简 介

全球视力受损患者共有2.53亿，包括3600万全盲患者。在互联网时代，盲人通过触觉对图形图像的认知需求越来越强烈。本书首先从理论角度研究触觉，然后通过盲人用户研究和实验分析，探索盲人的触觉认知特点和影响触觉认知的关键因素。之后本书从设计角度建立理论框架，探索了盲人的触觉认知及交互体验的设计理论与方法，并以此设计开发了触觉图形显示器。该设备能渲染盲文和图形信息，可以作为教育资源广泛应用于学校、公共场所及盲人家庭。

图书在版编目(CIP)数据

面向盲人触觉认知的触觉显示与体验研究/焦阳著.—北京：清华大学出版社，2019
(清华大学优秀博士学位论文丛书)
ISBN 978-7-302-53163-0

Ⅰ.①面…　Ⅱ.①焦…　Ⅲ.①触觉—识别系统—研究　Ⅳ.TP391.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第116118号

责任编辑：梁　斐
封面设计：傅瑞学
责任校对：王淑云
责任印制：杨　艳

出版发行：清华大学出版社
　　网　　址：http://www.tup.com.cn，　http://www.wqbook.com
　　地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
　　社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
　　投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
　　质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 刷 者：三河市铭诚印务有限公司
装 订 者：三河市启晨纸制品加工有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：155mm×235mm　　**印　　张**：10.75　　**字　　数**：178千字
版　　次：2019年6月第1版　　**印　　次**：2019年6月第1次印刷
定　　价：69.00元

产品编号：082498-01

一流博士生教育
体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)[①]

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

---

① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929 年 6 月 3 日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际,通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在 20 世纪 80 年代初对到访纽约州立大学石溪分校的 90 多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001 年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权力和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面，要努力突破学科领域的界限，注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径，博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于 2014 年创办了"微沙龙"平台，同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3 年来，博士生参与和发起"微沙龙"12 000 多场，参与博士生达 38 000 多人次。"微沙龙"促进了不同学科学生之间的思想碰撞，激发了同学们的学术志趣。清华于 2002 年创办了博士生论坛，论坛由同学自己组织，师生共同参与。博士生论坛持续举办了 500 期，开展了 18 000 多场学术报告，切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究，超过 60% 的博士生有海外访学经历。清华于 2011 年设立了发展中国家博士生项目，鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研，在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面，权力要进一步下放，学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力，也应担负更多的责任。清华大学从 2015 年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会，学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关，校学位委员会负责学位管理整体工作，负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用，面向世界、勇于进取，树立自信、保持特色，不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。

邱勇

清华大学校长

2017 年 12 月 5 日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育，肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任，是国家发展战略的重要组成部分，是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校，清华大学自20世纪80年代初开始，立足国家和社会需要，结合校内实际情况，不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境，我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围，一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目，激励博士生潜心学术、锐意创新，提升博士生的国际视野，倡导跨学科研究与交流，不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量，思维活跃，求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿，吸取本领域最新的研究成果，拓宽人类的认知边界，不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书，不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现，也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新，激励优秀的博士生脱颖而出，同时激励导师悉心指导，我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果，更好地推动学术交流与学科建设，促进博士生未来发展和成长，清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社，悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导，使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前，促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考，为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文，从选题、研究到成文，离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统，成就了一项项优秀的研究成果，成就了一大批青年学者，也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言，帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果，连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风，都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神，对论文进行了细致的修改完善，使之在具备科学性、前沿性的同时，更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科，从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情，能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生，将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想，百折不挠！在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新，做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候，在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时，能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018 年 1 月 5 日

摘　要

根据世界卫生组织(WHO)在2017年的数据,全球视力受损(visually impaired)患者共有2.53亿,包括3600万全盲患者。90%的视障人群生活在发展中国家。研究表明,人的大脑每天通过五种主要感官接收外部信息。它们的比例分别为:味觉1%、触觉1.5%、嗅觉3.5%、听觉11%,以及视觉83%。由此可见,视觉信息在人们的日常生活、交流与学习中极为重要。众所周知,盲人可以通过盲文图书来学习和理解文字内容,也可以使用读屏器等语音辅助软件来通过声音进行网上交流;但是目前极度缺乏帮助盲人有效学习和理解图形图像信息的工具和设备。本项工作旨在通过盲人的触觉认知与交互体验研究,设计与开发能够辅助盲人学习和理解图形图像信息的工具,即面向盲人的触觉图形显示器。

本书首先从理论角度,归纳总结触觉的相关研究,从触觉的生理、情感和心理的维度进行分析,推导信息交互中触觉的可用性和重要性。然后结合盲人用户群体,通过用户研究和实验分析,探索盲人的触觉认知的特点和影响触觉认知的关键因素,并对触觉认知理解的图像幅面尺寸、触摸方式和触听觉多通道认知做了定量实验研究,可以作为设计的基础性数据。之后研究了盲人触觉体验的特征、本质和影响因素。基于以上分析,本书尝试从设计角度建立理论框架,探索盲人的触觉认知及交互体验的设计理论与方法,以符合盲人用户的具身认知、合理使用隐喻、动态示能与动态限制的统一、成本控制为设计原则,以信息无障碍为设计目标,以信息时间和空间、产品功能与数字内容、信息架构与交互逻辑、产品造型和用户界面为设计要素,并将以盲人用户为中心、以自然交互为方式、以内容意义为根本、以信息转化为导向作为设计方法,完成了盲人触觉交互体验设计的方法论的构建。

最后基于上述研究成果,进行触觉图形显示器的设计实践与验证。该设备采用创新的结构设计,实现了良好的触觉认知体验和相对的成本控制。它不仅能够渲染丰富的触觉图像信息和布莱尔盲文,而且可以作为教育资源广泛应用于学校、公共场所及盲人家庭。

关键词: 盲人;触觉认知;触觉体验;触觉图形显示

Abstract

According to WHO statistics in 2017, there are approximately 253 million people suffering visually impaired in the world, including 36 million totally blind individuals, 90% of which living in developing countries. Studies by educational researchers suggest that approximately 83% of human learning occurs visually, and the remaining 17% through the other senses —11% through hearing, 3.5% through smell, 1% through taste, and 1.5% through touch. Thus, visual information is extremely important in daily life, communication and learning. It is well known that the blind can learn and understand texts through Braille, such as Braille books, or make use of voice-assisted software such as screen reader to communicate online by voice, but there is very limited tool to help the blinds learn and understand graphical information. This book aims to study haptic perception and interaction experience for the visually impaired, and design a tool for assisting blind people to learn and understand graphical information through touch, namely, a graphical tactile display for the blind.

In this book, from the theoretical point of view, the related research of haptics is summarized, including the physical, emotional and psychological characteristics of touch, deducing the usability and significance of haptics of information interaction. And then focuses on the blind users theoretically and realistically by exploring the characteristics of the blind haptic perceptions and the key factors by user research and experimental analysis. Multiple haptic cognition factors: image format size, ways of touch, multi-sensory cognition and guided cognition are studied by quantitative experiments, as the basis of design and guidance of design theory. Then, the characteristics, essence and key factors of haptic experience and blind haptic experience are studied. Based on the above analysis, this paper attempts to establish a

theoretical framework from the design point of view to explore the design theory of blind touch and cognition experience, with the design principle of meeting the blind user's embodied cognition, rational use of metaphor, united of dynamic affordance and dynamic constraints, and reasonable costs; the design destination of "universal accessibility"; the design elements of information time and space, product functions and digital contents, information structure and the interaction logic, and product modeling and user interface; the design methodology of blind user centered design, natural interaction patterns, content meaning first, and information transfer originating, completing the methodology framework of haptic interactions and experiences of the visually impaired.

Last but not least, based on methodology above, a novel graphical tactile display is designed and implemented. The innovative structural design achieves good haptic perception experience and the relative cost balance. It can render rich graphical tactile images as well as Braille, which can be widely used as educational resources in schools, public places and blind families.

Key words: visually impaired; haptic cognition; haptic experience; graphical tactile display

目　录

Contents

第1章　引　　言

1.1　选题背景

1.1.1　信息时代，盲人面临的困难

根据世界卫生组织（WHO）在2017年的普查数据，全球视力受损患者共有2.53亿，包括3600万全盲患者。[①] 大多数盲人生活在发展中国家，教育资源非常有限。

研究表明，人的大脑每天通过五种主要感官接收外部信息。它们的比例分别为：味觉1%、触觉1.5%、嗅觉3.5%、听觉11%，以及视觉83%。[②] 由此可见，视觉信息在人们的日常生活、交流与学习中极为重要。因此视力受损患者在日常学习、工作和生活上都存在诸多不便。通常来说，他们使用听觉作为信息获取的重要通道，比如通过语言对话、收听收音机等方式。近年来随着电脑、手机等智能终端的普及，文字转语音（text to speech）[③]、语音合成（speech synthesis）[④]等技术可以帮助盲人"听到"文字内容。除听觉外，触觉也是盲人获取信息的重要方式，包括从最基本的对物体的触摸感知，到用手指阅读布莱尔盲文（Braille）图书、纸质的触觉图形图像等材料。触觉和听觉是视觉受损人群获取信息最重要的两种方式。

然而，随着信息时代的到来，尤其是近几十年来互联网的快速发展，数字信息量呈指数爆炸形势，比如互联网上的大量图片、视频甚至虚拟现实

---

① World Health Organization. Global Data on Visual Impairments 2010[M]. 2012.

② U.S. Department of Labor. Presenting Effective Presentations with Visual Aids[R]. OSHA Office of Training and Education. 1996.

③ 文字转语音（text to speech，TTS）：利用计算机技术，识别虚拟的文字信息，并通过计算机朗读文字。它是人机对话的一部分，让机器人能说话。

④ 语音合成（speech synthesis）：将计算机自己产生的或外部输入的文字信息转变为可以听得懂的、流利的汉语口语输出的技术。

(virtual reality)①、增强现实(augmented reality)②等视觉信息,且绝大多数信息依靠计算机的电子显示屏呈现。信息时代带来的海量数字信息加重了人们对视觉通道的依赖。而盲人由于视力受损,无法有效获取这些主流的数字信息,对他们的学习、工作和生活造成了很大的障碍。

特别是随着高新技术的日新月异,盲人可能受到更多的挑战。因为盲人朋友对身边生活的常用物品尚可理解和使用,但对没有出现在生活周边的尖端的科技和产品,他们仅能靠抽象的文字语言了解,对具体的样子和形状没有概念,无法直观地理解。盲人和明眼人对主流信息的获取差异,造成盲人群体的知识学习和对高新技术的掌握濒临难以跟上时代步伐的危险。

在国内,新中国成立后,政府大力支持发展残疾人事业,从教育、工作和日常生活上给予关照和帮助。在教育产业上,我国有专门针对盲人群体的小学、中学进行基础教育,比如北京市盲人学校;另外一些大学、高校也开设特殊教育学院接纳盲人学生,比如北京联合大学特殊教育学院等。但尽管如此,我国还是发展中国家,许多无障碍设施和残疾人的相关制度还有待完善。盲人由于视力受损,很多时候无法像健全人一样获得平等的教育机会和工作机会。如何帮助盲人学习获取更多有用的知识,如何让他们和健全人一样享受科技发展带来的便捷,跟上世界的发展潮流,一直都是世界范围内极具价值的研究方向。

1.1.2 触觉交互——盲人的重大需求

人自古以来就会利用触觉感受物质与自然,触觉是人作为生物体的本能感觉。亚里士多德在《论灵魂》和《感官与感觉》中,把感觉分为五种:视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉,并认为,"没有触觉就不可能有其他的感觉"、"触觉是动物所唯一必备的感觉"③。触摸在我们日常生活中无处不在,如

---

① 虚拟现实(virtual reality,VR):是由美国 VPL 公司创建人拉尼尔(Jaron Lanier)在 20 世纪 80 年代初提出的。其具体内涵是:综合利用计算机图形系统和各种现实及控制等接口设备,在计算机上生成的、可交互的三维环境中提供沉浸感觉的技术。其中,计算机生成的、可交互的三维环境称为虚拟环境[176]。

② 增强现实(augmented reality,AR):是一种实时地计算摄影机影像的位置及角度并加上相应图像、视频、3D 模型的技术,这种技术的目标是在屏幕上把虚拟世界套在现实世界并进行互动。这种技术于 1990 年提出。随着随身电子产品 CPU 运算能力的提升,预期增强现实的用途将会越来越广[177]。

③ 亚里士多德. 亚里士多德全集[M]. 苗力田,主编. 北京:中国人民大学出版社,2016.

抚、按、摸、点、捏、压、划、拽、抓、拉、吻、亲等接触性的动作行为，能以最直接的方式感知周围事物。从我们呱呱坠地的那一刻起，便开始用触觉去感受世界。触觉是人类认知最早、最基本的途径，帮助人们在成长的过程中逐步建立对世界的理解和认知。

因此，在盲人用户的信息获取和交互时，相比于听觉的抽象语言文字信息，触觉的实体信息具有更直观、更具象的特点。在面对具象的信息或概念时，采用触觉的方式触摸三维模型或二维的触觉图像是知识学习非常有效的方法。事实上目前在盲人学校中，对图形图像和三维空间的知识教学，也通常采用实体模型和纸质触觉图像等方法，利用触觉的实体认知进行具象的知识学习。

实体模型是实物按一定大小比例缩小的模型复刻版，多用于一些基础的概念学习。但因为其制作过程相对复杂，在盲人学校中实体模型的资源较少，盲人学生使用更多的是纸质的触觉图像。

触觉图形图像是利用材质的凹凸高度、纹理等触觉特点，在二维平面上显示的图形图像，通常由热敏、塑胶印刷、热塑和 Tiger 盲点打印等方式制作，如图 1.1 所示。

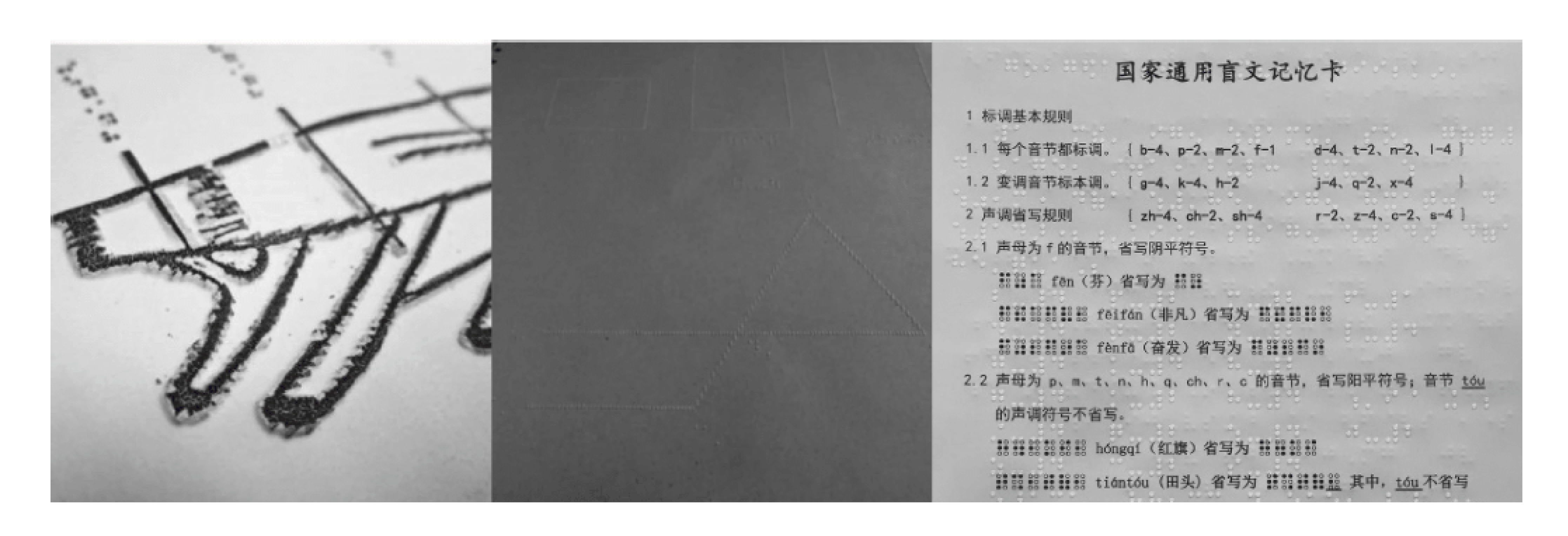


图 1.1　盲人纸质触觉辅助教具举例

左：热敏纸；中：Tiger 打印；右：塑胶印刷

目前，这类纸质的触觉图像大多用于盲校的教科书和考试卷中，作为文字的配图和数学、几何学习之用。然而，这些静态的纸质触觉图像在使用上存在诸多不便。它们作为学习用具极易损坏，成本高昂，大量的纸质图像非常笨重且不易保存。最重要的是，在当今互联网时代，以纸质承载方式存在的静态图像无法帮助盲人用户理解动态的图形图像信息，不能交互。

有鉴于此，从 20 世纪开始，相关的业界和研究机构着手探索针对盲人用户的动态图形图像显示方式，比如触觉图形显示器。它的主要功能是通过实时的表面形变，动态地渲染触觉图像。由于涉及动态的实体形变，这给触觉图形显示器的结构设计和制造增加了极大的难度，目前一些原型设备的售价非常昂贵，比如德国 Metec-AG 公司的 Display 7200（见图 1.2）[①]，在 2016 年价格为 5 万欧元，而且其功能性、易用性和整体的交互体验都有待提高，因此也没有在市场上真正有效地推广使用。

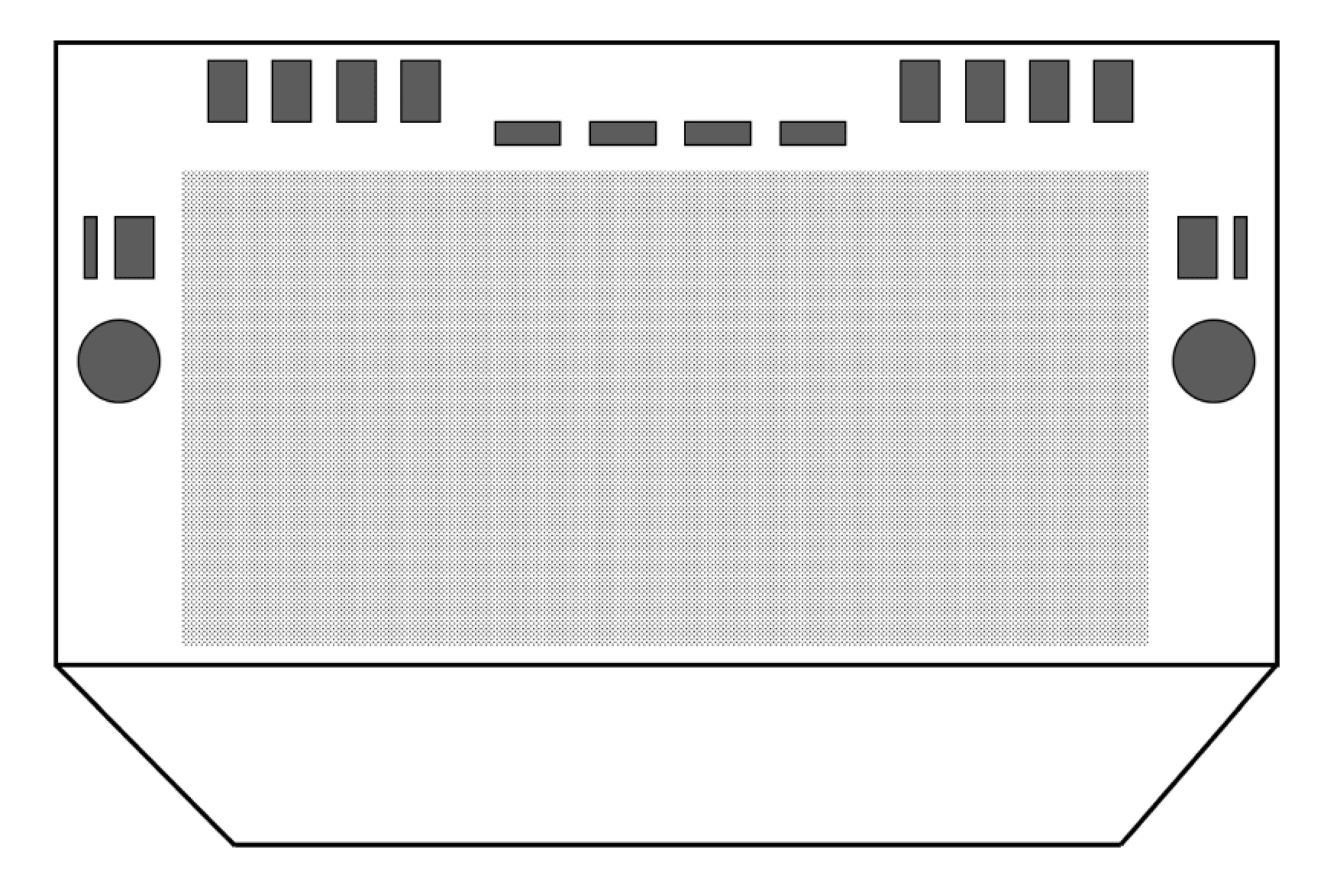


图 1.2　Display 7200 触觉图形显示器

虽然目前既有的触觉图形显示器原型研究还没有达到盲人用户的要求，但基于盲人用户理解图形图像的重大需求，它仍然代表着利用触觉通道进行图形图像认知和交互，以及互联网信息学习的未来方向。这也是目前多家学术机构和产业界的研究重点。

1.1.3　多样化的人机交互界面

自从人类开始使用石头、木棍，并制作斧子、轮子等工具时，便开始思考人与外界环境及生产工具的交流方式。18 世纪中叶，工业革命开创了机器生产的时代，机器设备解放了简单的人工劳动，显著提升了生产力。与此同时，机器也越来越多地进入人类的生产与生活。随着第二、第三次工业革命

① METEC-AG. Hyperbraille Display 7200 User's Manual［M］. Stuttgart：METEC-AG，2014.

的开展，生产力进一步提高，1946 年美国研制出第一台电子计算机[①]，打开了人类进入信息时代之门。机器除了机械属性，又加入了电子属性和计算属性，变成了更庞大的系统。因此，如何使机器更友好地为人服务，满足人的需求，逐渐从问题变成了学科。

1959 年美国人沙克尔从人在操纵计算机时如何能减轻疲劳出发，发表了关于计算机控制台设计的人机工程学的论文[②③]，从此开创了探寻人与机器交流方式的新学科，即人机交互(human-computer-interaction)。

用户在使用计算机的过程中，信息流不断地从计算机端和用户端交互往来。复杂庞大的信息量需要以设计的方式整理，并有效地传递，此为信息设计[④]。在计算机科学初期，设计和开发人员对软硬件产品的可用性或"用户友好性"关注甚少。然而，随着越来越多的用户期望设备易用，终于把研究者的注意力聚焦到可用性(usability)[⑤]上。可用性的提升，正是因为科技和信息设计的进步。

经过几十年的发展和演变，计算机和广义的机器在功能上突飞猛进，复杂度越来越高，因此给使用者也带来了更高的要求。相应地，为了克服用户使用及操作机器的问题，通过信息设计，人机交互领域在交互界面上和交互通道上也有了显著的更新和迭代。在界面上，从最早的单独命令识别的命令行界面(CLI)[⑥]，到目前最常用的图形用户界面(GUI)[⑦]，以及虚拟现实、增强现实等虚实融合的界面；在交互通道上，从基础的视觉命令文字，到高分辨率图形界面，以及融入触觉、听觉等多通道的交互方式。[⑧] 这些界面、

① 保罗·莱文森.软利器：信息革命的自然历史与未来[M].何道宽，译.上海：复旦大学出版社，2011：7-32.

② B. Shackel. Ergonomics for a computer[J]. Design，120(1959)：36-39.

③ B. Shackel. A Note on Panel Layout for Numbers of Identical Items[J]. Ergonomics，2(1959)：247-251.

④ 孙皓琼.图形对话：什么是信息设计[M].北京：清华大学出版社，2011.

⑤ Jakob Nielsen. Usability Inspection Methods[C]//Proceedings of CHI'94 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems. 1994：413-414.

⑥ CLI：Command Line Interface，命令行界面，早期电子计算机的交互方式，比如微软的 Dos 操作系统。

⑦ GUI：Graphics User Interface，图形用户界面，比如微软的 Windows 操作系统、苹果的 MacOS 等。

⑧ Bolt RA. "Put-that-there"：Voice and Gesture at the Graphics Interface[M]. California：Life Time Learning Press，1984.

通道上的演进是为了实现人能更好地利用机器,并完成人设定的任务,同时耗费使用者最少的精力和成本。

21 世纪又是移动互联网的时代,自从 2007 年苹果公司发布 iPhone 以来,智能手机普及率快速上升。伴随着无线通信的发展,以及 3G、4G 无线网络的覆盖,移动终端的处理能力和信息的传输能力都有质的提升。在移动智能终端,人机交互又呈现了新的特点和方式。用户需要随时随地获取实时信息,且可能同时进行多个任务。复杂的人机交互需求推动着业界和本领域的研究机构的探索,人机交互的发展正在迈向多样化的新时代,寻求更智能、高效、自然的人—机—环境的交互体验。我国的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将人机交互列为国家重大战略需求的关键技术[①],《麦肯锡 2013 年报告》也提到,人机交互在 2025 年将对全球经济产生 13.3 万~28.2 万亿美元的影响[②]。

然而在一般用户的日常生活中,我们只利用了有限的感官通道进行输入输出,并获取信息:视觉屏幕作为主要的信息获取方式,键盘、鼠标和触摸屏作为控制通道。其中,键盘鼠标只给用户提供了机械的回弹和移动属性,而触摸屏则只有玻璃屏幕的触感和有限的震动反馈。我们在进行信息获取和交换的过程中,没有充分利用触觉和实体的交互。

正因为此,目前针对实体交互界面、多感官、多通道交互界面的研究一直是学术界的前沿领域。比如针对触觉的研究,引入力/触觉反馈机制,使用户不仅能看见虚拟对象,还可以触摸到它的几何性状和物理特征,从而使虚拟的交互更加真实和易于理解。[③]

总之,多样化的人机交互界面能充分利用人的多个感官通道,在增加沉浸感、实现更自然的交互的同时,也为某种感官受损的用户提供了其他途径的交互方式,从而实现通用设计、无障碍设计。这是未来交互界面的设计方向。

---

① 中华人民共和国科学技术部. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[OL]. http://www.most.gov.cn/kjgh/.

② 麦肯锡. 2013 年中国电子零售业革命报告[OL]. http://www.199it.com/archives/116657.html.

③ 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学(F 辑: 信息科学),2009,39(1): 2-46.

1.1.4　人机交互中的设计驱动

“设计”作为人类社会发展进程中自觉性的创造活动，必然会受到社会、经济、技术等多方面因素的影响。① 在大批量生产的工业化时代，设计通常意在通过物理设计、合理的尺度、质感及造型，以改进人与机器接触时对人的友好反馈，让工业文明的成果更好地造福于人。而在信息社会，尤其是计算机技术的进步，大数据背景下的数字化生产、虚拟设计制造、数字化“操作”等“信息化”的生产生活方式已经成为国民经济的重要组成部分，深入到生活的方方面面。②因此，信息设计推动着以上进步，在互联网、大数据、人工智能的社会发展趋势下，整个设计学科在发生根本性的变革。计算机中非物质的信息成为设计的本体之一，需要建构新的设计理论、设计思维、设计方法和程序，以及设计美学范式和设计评价准则，形成一个适合非物质社会发展趋势的新的设计学科体系。同时，由于设计本身及其服务对象的复杂性，设计的多学科融合成为必然要求。因此，未来设计的重心已经从工业化时代关注有形的产品，过渡到关注“人-产品-社会-环境”之间的“相关关系”。③

而在信息与交互设计的实践层面，其侧重点不再停留于表现层次，而更多的是基于自身艺术形态的特点，从单纯技术性的应用转变成对社会、人文、环境的关怀；从技术理性转向人文感性；从宏观的场景感受过渡到微观的细节体验。信息艺术设计产品改变的不仅仅是人们与社会信息交流和交换的方式，更多的是借助于这些产品或者系统，去感受日常生活中的方方面面，改善人们对于习以为常的生活、工作、学习和娱乐的体验。④

信息设计发展的必然结果是多学科的融合。在跨学科的交叉创新方面，不能抱着工业化时代分工明确的思维，过分重视相互间的接线与差别。⑤⑥而艺术与科学的融合，使二者的便捷变得模糊而不明确⑦，借助网络性的分配模式，促进了艺术和知识的流通，创造了一个知识和艺术的互文结

①～⑤　陈志刚，鲁晓波．大数据背景下信息与交互设计的变革和发展[J]．包装工程，2015，36(8)：6-9．

⑥　徐芳．交互设计与政府网站信息服务优化研究[J]．电子政务，2012(112)：27-32．

⑦　胡晓琛．中国语境下的交互设计研究[J]．科技传播，2014．

构。①② 1999 年美国学者西多夫提出由“信息设计”“交互设计”“感知设计”三个层面交叉组成的信息与交互设计的概念。③ 行为、内容和形式成为交互设计的三要素。

交互设计诞生在工业设计、传达设计、人机交互、认知心理学、人类学和社会学等学科交叉的领域，是一门新兴的、解决如何使用信息化产品的、交叉性很强的设计学科。④

作为面向使用设计的学科，交互设计的任务就是设定用户的使用行为，并通过规划信息的内容、结构和呈现方式来引导用户的使用。因此说，行为、内容和形式是交互过程的三个要素，也是交互设计要解决的三个核心问题。其中，行为的序列是交互过程的框架，也决定了交互的模式，是交互设计的核心；内容是交互过程中所提供的功能，包含了具体的信息和信息的组织结构，是交互设计的基础；形式是交互过程实现的依托，包含了视觉、听觉和触觉等界面表现形式，是交互设计的具体内容。⑤

数字技术已经改变了人和产品之间的交互方式，信息时代中交互产品的设计不再是一个以造型为主的活动，不再只是设计出精美或实用的物体，设计应更关注人们使用产品的过程⑥，特别是与虚拟的数字信息的交互过程。最终，以设计的力量影响科技的发展、社会及市场的走向，以及人们的生活方式。

1.2 研究内容

1.2.1 问题的提出

本书题目为“面向盲人触觉认知的触觉显示与体验研究”。基于上节的研究背景，本书的研究内容如下：首先从学术理论角度，归纳总结触觉的相关研究，研究触觉在信息交互中的可用性和重要性，然后关注盲人用户群

---

① 陈志刚，鲁晓波．大数据背景下信息与交互设计的变革和发展[J]．包装工程，2015，36(8)：6-9．

② 刘毅．工作室体系下的交互设计教学初探——以广美交互设计工作室为例[J]．装饰，2013(239)：143-144．

③ 陈志刚，鲁晓波．大数据背景下信息与交互设计的变革和发展[J]．包装工程，2015，36(8)：6-9．

④～⑥ 吴琼．交互设计的域与界[J]．装饰，2010(201)：34-37．

体，理论联系实际，通过用户研究和实验分析，探索盲人触觉认知的特点和影响触觉认知的关键因素，以及盲人的触觉体验。基于以上分析，本书尝试从设计角度建立理论框架，即盲人的触觉认知及交互体验的设计理论与方法，从设计原则、设计目标、设计要素和设计方法四个方面详细论证。最后根据这套理论方法，进行触觉图形显示器的设计实践，实现理论与实际的相互印证和迭代改进。

针对本书的研究内容和研究思路，目前在触觉交互领域、盲人用户的触觉认知及交互体验，以及触觉图形显示器设计等三个重点方向，都有很多学术问题和应用困难亟待解决：

（1）触觉通道的信息交互

触觉作为人的一种感觉，其地位举足轻重。触觉感官遍布皮肤，但往往最常见的场景是用手——触觉感官最密集，且肌肉运动最灵活的部位——触摸实体，并操作实体。输入方面，实体的材质、纹理、质量、温度、形状以及某些电信号都可用触觉捕捉，使用户完成此实体的外部信息的认知和学习；输出方面，用户通过手部肌肉对该实体施加外力，从而使实体产生形变。一般用户每天都在使用触觉完成各类工作，但作为一种信息交互的通道，相比视觉而言，触觉还有更多信息交互的空间。

在目前主流的智能终端，如个人电脑、移动电话、可穿戴设备中，触觉通道目前只起到辅助作用，视觉仍是信息交互的主流通道，尤其在信息输入方面，显示器是用户在绝大多数场景下获取信息最主流的方式。比如在桌面或移动电脑端，以及移动手机端，用户都是观看显示屏呈现的文字、图形或多媒体信息进行信息输入，再通过键盘、鼠标以及触控方式进行信息输出。在这些常见的信息交互过程中，与触觉相关的仅限于键盘鼠标的实体质感，以及触摸玻璃屏幕的触感，基本没有承载交互过程中的信息。

有鉴于此，在一些最新的可穿戴设备中，一些无须视觉的交互操作用到了触觉的信息交互，比如手机或手环的震动提醒，但也仅限于震动的触觉反馈。事实上，触觉交互远不只震动反馈。我们如何在目前的信息交互框架上以自然的方式增加触感的体验？尖端科技进步很快，如何运用新型材料创造变化的、承载信息量的触摸体验？能否基于触觉交互体验，揭示出人的触觉通道信息设计的原则与方法？

（2）盲人用户的触觉认知及交互体验

盲人用户由于视力缺陷，触觉和听觉是其依赖的两个重要感官通道。

自19世纪路易斯·布莱尔[①]发明布莱尔盲文以来，这种触点式的盲文被广泛推广和使用。盲人依靠触觉触摸由点方组成的盲文，极大地降低了阅读文字的难度。图1.3为现行盲文点字举例。

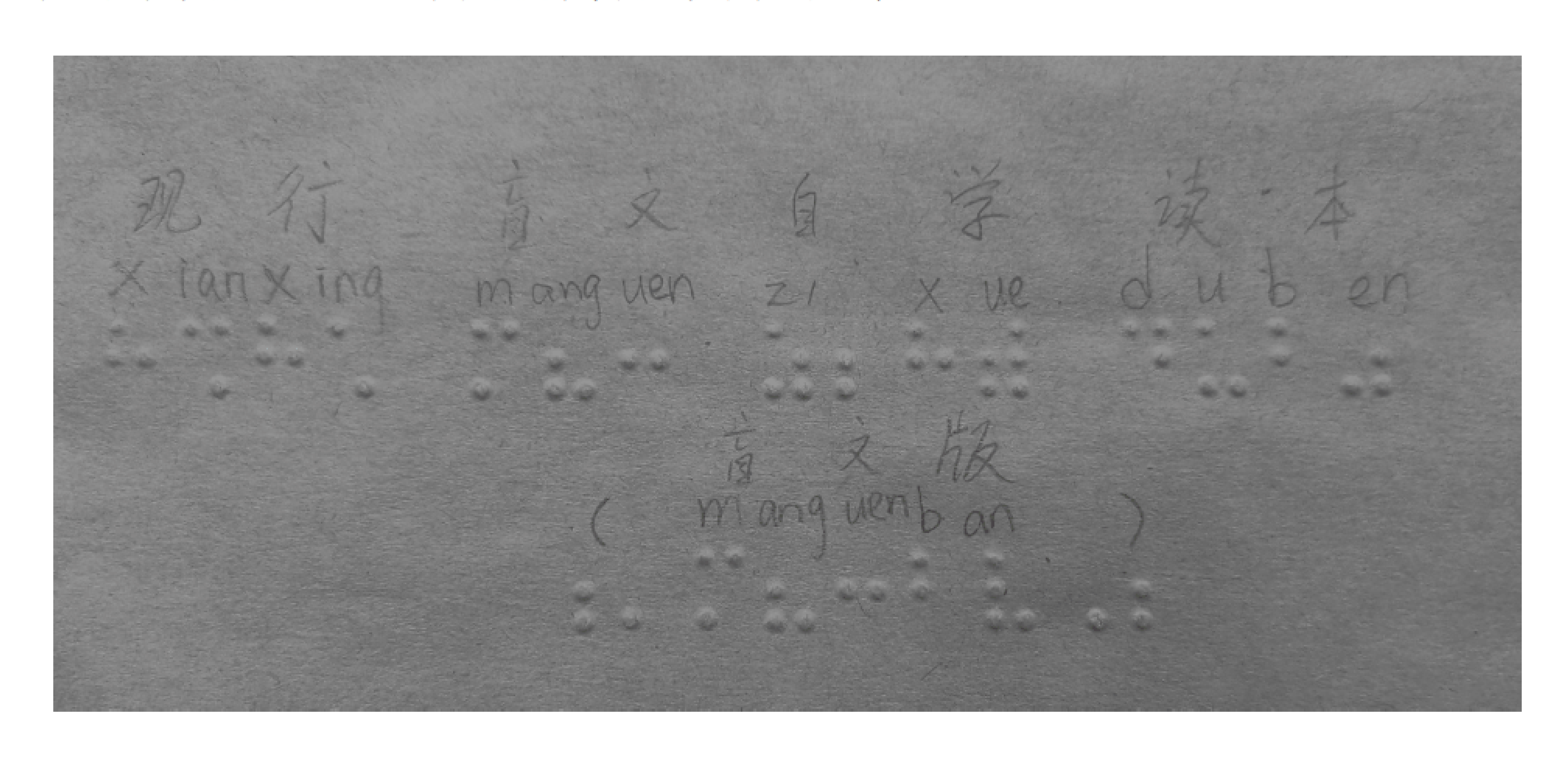


图1.3　现行盲文点字举例

除了在纸张上制作盲文点字外，图形图像也可以在纸上以凸起的形式表现，用压印、盲文触点打印、热塑等方式即可制作凹凸的承载触觉信息的纸张。然而此类特殊纸张成本较高，不易保存，最重要的是在信息时代，纸张触觉图像无法动态实时地承载触觉信息，也就无法帮助盲人使用互联网。点显器[②]的发明解决了部分问题，它能动态地显示布莱尔盲文，它的每一个凸点都可以实时升降。由此，点显器与电脑连接后即可显示实时的盲文信息，开辟了盲人通过触觉访问互联网的通道。

然而，点显器只能承载文字信息，功能比较单一。文字信息可以用文字转语音和语音合成等其他方式通过计算机朗读，以听觉的方式让盲人获取信息。而且采用听觉方案成本很低，点显器则动辄几万人民币，更不利于盲人群体的广泛使用。所以点显器并没有抓住盲人触觉体验的痛点。在互联网时代的今天，如何为盲人设计优秀的辅助设备，以触觉为主要通道，使用户能更方便地访问互联网，是值得我们思考的问题。

(3) 触觉图形显示器的再设计

广义地说，图像是所有具有视觉效果的画面。在网络的巨大信息量中，

---

① 路易斯·布莱尔(Louis Braille，1809—1852)：生于法国巴黎东部的考普瓦利，在盲人学校创造出一种简单、实用的“点字盲文”，给无数盲人带来了光明。

② 点显器：动态的盲文显示器。通常与计算机连接，将计算机中的文字以盲文的形式在设备中显示。

图形图像信息占据极其重要的地位，比如海量高清照片和视频，以及所有网站所呈现的图形用户界面。

遗憾的是，以上信息皆依靠视觉通道，在面向视力受损人群时，图像信息难以传达。但图形图像又如此重要，因此，如何学习并理解图像，是盲人的迫切需求。

针对这个问题，利用纸张的凹凸不平，用触觉信息承载视觉图像信息的方式，是一直以来的解决思路。然而正如纸质盲文一样，它们不能承载实时的、动态的文字和图像信息，不能真正帮助盲人无缝联网。

因此如研究背景所述，业界和研究机构正着手探索触觉图形显示器。但采用“压电陶瓷”技术的大幅面触觉图形显示器价格过于昂贵，小幅面的设备又无法在一页中显示足够多的图像内容，用户体验不佳。

面对用户需求与业界产品的矛盾，触觉图形显示器的设计瓶颈该如何突破？产品的使用体验与盲人用户的触觉体验具有怎样的内在联系？如何以触觉图形显示器为切入点，挖掘盲人用户触觉交互的范式？

1.2.2　关键术语的界定

回到本书题目“面向盲人触觉认知的触觉显示与体验研究”，其所涉及的研究主体包括：触觉、盲人用户、触觉图形显示；研究行为包括：认知、交互及体验。下面将对每个关键词进行简要陈述和分析，并定义本研究下词语的限定标准。

（1）触觉

汉语词典对触觉的解释为：肤觉的一种。辨别外界刺激皮肤情况的感觉。按刺激的强度可分为接触觉和压觉，前者在皮肤受轻轻刺激时就可产生，后者在刺激强度加大使皮肤部分变形时才产生。另外还有以一定频率的振动刺激皮肤所产生的振动觉。这也是本课题对触觉的定义。本课题讨论皮肤在受外力作用下的感觉，并主要面向皮肤触觉最敏感的部位：人的双手。

同时，本课题对触觉的研究范围覆盖主动触觉与被动触觉。主动触觉是人主观移动手和手指，对物体进行触摸感知，包括触觉和肌肉运动知觉。被动触觉包括两种方式：第一是身体的各个部位（包括双手）在静止状态下受到外力作用而产生的触觉；第二是人手在放松状态下，受外力牵引而被动运动，同样包括触觉和肌肉运动知觉。详细的触觉分析在第 2 章展开。

（2）盲人

视力受损，是指由于各种原因使视觉器官或大脑视中枢的构造或功能

发生部分或完全病变，导致双眼不同程度的视力损失或视野缩小，视功能难以像一般人一样在从事工作、学习或进行其他活动时应用自如，甚至丧失。我国法定的视力残疾是，优眼最佳矫正视力低于0.3(不包括0.3)或视野半径小于10°。

视力残疾一般分为盲和低视力两类，我国视力残疾的分类标准与世界卫生组织(WHO)制订的标准对照表见表1.1。

表1.1 盲人视力标准，来自WHO和中国残联

最佳矫正视力a	中国标准（类别）	中国标准（级别）	WHO标准（类别）	WHO标准（级别）
无光感	盲	一级	盲	5
无光感<a<0.02	盲	一级	盲	4
0.02≤a<0.05	盲	二级	盲	3
0.05≤a<0.1	低视力	三级	低视力	2
0.1≤a<0.3	低视力	四级	低视力	1

在本课题中，我们在研究盲人用户的触觉认知及交互体验时，限定研究用户为全盲患者(中国标准为一至二级，WHO标准为5～3级)，即视觉受损至无法使用。

(3) 触觉图形显示器

当今时代，盲人理解图形图像的需求越来越强烈，而网络中蕴含的海量图形图像信息难以用传统方式传递给盲人。触觉图形显示器(或触觉图形显示器、触觉显示器、盲人显示器)是指能够以触觉的方式渲染图形图像，并让盲人用触觉理解图形图像的设备。其核心在于“触觉显示(render by haptics)”，且区别于普通的视觉屏幕显示器，而是将视觉显示器中每一个像素的视觉信息替换为触觉信息。触觉图形显示器根据其触点尺寸、交互方式和应用场景等特点分成多个类别，在本书第3章作详细说明。

(4) 认知、交互及体验

认知、交互与体验表示用户在某种环境中的行为。认知即“认识和感知”，狭义的认知为针对某一个图形、某一段文字等特定的信息的学习、认识、感知和理解，广义的认知为用户通过不断学习，建立起自己的一套对于外界环境和内在信息的看法。交互为人与外界信息的交流和互动，比如“人

机交互”，则是人对计算机的控制和相应的反馈，并伴随信息的双向流通。体验为用户通过主观行动和亲身经历认识周围的事物。

在本书中，认知侧重信息从外界流向用户，使信息被用户认识、感知和理解，包括某一次的狭义的认知和广义的知识学习的认知；交互侧重信息与用户的双向流通，以及用户根据获得的信息所做出的反馈操作。体验则表示在单向或双向的信息流通过程中，用户的主观感觉和感受，强调从本体端评价外部信息。图 1.4 显示的是本书中认知、交互和体验的关系。

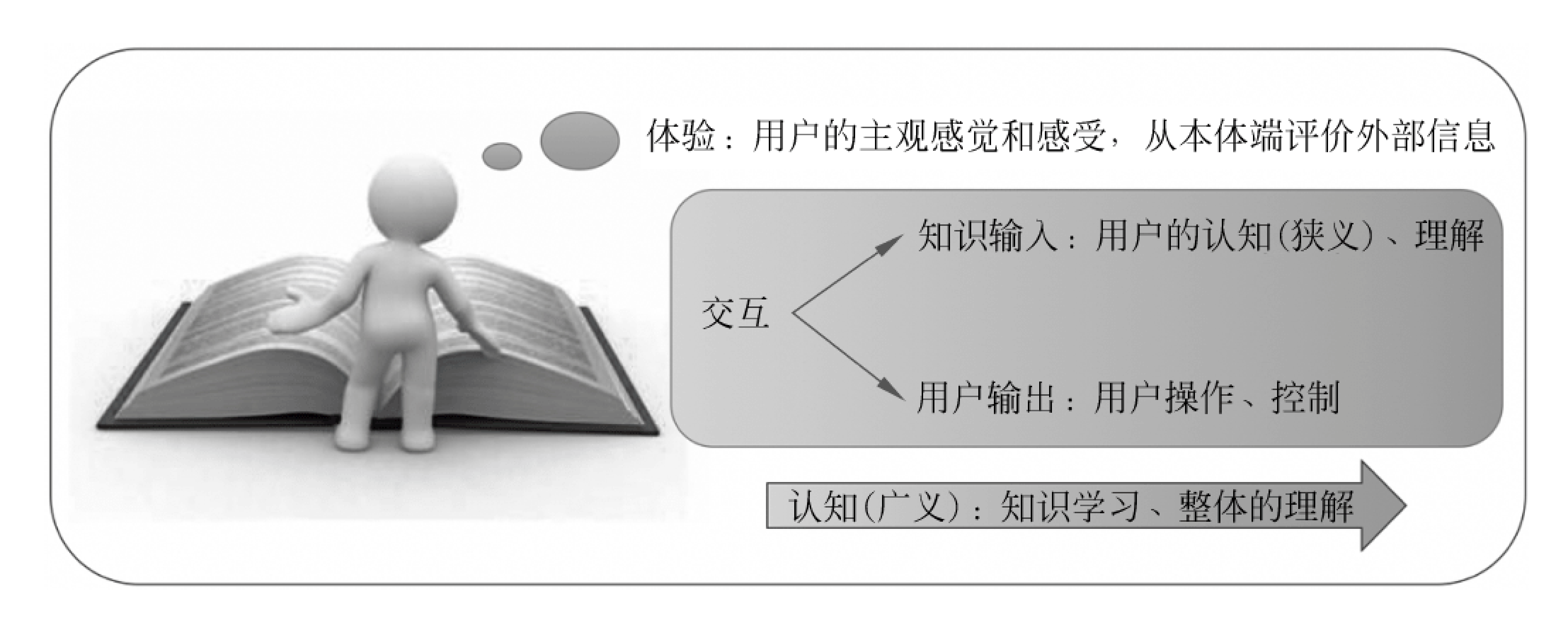


图 1.4　认知、交互与体验的关系

1.3　研究意义与创新点

1.3.1　研究意义

本课题探索面向盲人触觉认知的触觉显示和体验，并进行触觉图形显示器设计研究。

第一，在互联网和大数据时代下，本书面向盲人用户，探索盲人的触觉认知及交互，以及盲人的触觉体验，从设计的角度提出针对盲人的触觉交互研究框架，并设计了一款面向盲人的相对低成本的触觉图形显示器。我们希望本课题的研究成果能够让盲人享受信息时代互联网的便捷和乐趣，改善和提高盲人群体的生活水平，促进盲人教育手段的发展。

第二，通过对触觉图形图像的理论研究和交互设计，本课题的研究成果对明眼人也将会有重大的意义。在目前的信息化时代，图形图像的信息呈现远远多于其他感官的信息传达。一些不需视觉（eyes-free）的信息设计正在兴起，即明眼人不需视觉，就可以完成某些任务，解放眼睛正在变为某些

场合的需求。所以,在研究面向盲人的触觉交互过程中,引入对照试验,即视力受损人群和明眼人群的对比,其触觉的研究结果有可能对明眼人也有帮助。

第三,本研究在实体交互界面领域具有参考价值。近年来一些研究机构和相关业界相继推出了多个实体交互的尝试,尽管在设计、交互和功能上有一定创新,但碍于体积、成本等因素,还无法创造更大的商用价值。本研究致力于设计开发一款相对低成本的触觉图形渲染显示终端,以触觉的形式动态显示和渲染图像,为实体交互界面的研究开创了一种新的思路和尝试。

1.3.2 创新点

本研究课题致力于通过盲人辅助设备,探索盲人触觉认知和体验设计,涉及多个学科,交叉性强。研究课题的预期成果包括:盲人触觉认知与交互设计,盲人触觉交互体验设计理论与方法,以及设计开发新型触觉图形显示装置原型。主要的创新点为:

- 进行了多角度的盲人触觉认知实验,并结合触觉的生理学和心理物理学特点,提出了盲人触觉交互设计的导向和原则;
- 提出了面向盲人的触觉交互体验的设计理论与方法,指导了盲人的触觉认知设计和触觉辅助设备的设计;
- 设计并开发了面向盲人的相对低成本的触觉图形显示终端,能够让盲人更方便地获取互联网的图形图像信息。

1.4 文献综述

1.4.1 信息源与文献检索

作为人身体中最基础的感觉,触觉在学术研究方面已有较长历史。研究涉及医学、神经科学、脑科学等。但在互联网和大数据的信息时代,将触觉通道引入信息交互设计的研究则是较为前沿的学术研究领域。针对触觉通道的非物质的信息设计,笔者借助 ACM 相关会议及刊物(如 ACM SIGCHI、SIGGRAPH、UIST)、IEEE 相关会议及刊物(如 IEEE Transactions of Haptics)、SSCI、中国知网、万方等数据库,对触觉交互设计的相关文献进行全面的收集整理。按关键词搜索,得到总共 250 篇文献。按照搜索关键词进行研究范畴分类,得到表 1.2。

表 1.2　各研究范畴的论文分布

分布		交互设计方法	触觉交互设计	盲人用户研究	盲人触觉辅助设计	合计
国内	论文数	40	42	36	15	133
	占比/%	30.0	31.5	27.1	11.3	100
国外	论文数	23	52	14	28	117
	占比/%	19.6	44.4	11.9	23.9	100

然后将以上涉及盲人、触觉、交互等内容的文献进行进一步整理，得出了以下四个领域的关键词，见表 1.3。

表 1.3　各领域研究关键词

人因	感官	方式	应用
用户行为研究 先天盲/后天盲/明眼人 有无盲人学校教育背景 学生/青年/中年	肤觉、肌肉觉替代 触觉替代 全身触觉 感受器 手腕	振动 皮肤力反馈 抓取、握力 摩擦力、玻璃控制 纹理生成 手的覆盖范围	出行导航 两人(多人)合作 驾驶控制与反馈 远程医疗 触觉显示器 手指交互操作

以上关键词均已经过出现频率的筛选和整理。

1.4.2　国内文献综述

针对以上信息源进行整理，在国内文献方面，李宏汀在触觉交互研究的回顾与展望中，总结了该领域的两个挑战和三个研究方面。两个挑战是：对于触觉感知特征的深入了解，主要是体觉方面，以此知道人对各种触觉刺激的不同参数感知的模式是什么；另一个在于生产工艺或技术的提高，使生产出各种前者需要的触觉装置或设备成为现实。三个研究方面是：触觉交互中的人类触觉机制研究，具体触觉界面设计及评价研究，虚拟现实中触觉交互的应用研究(如虚拟物体力触觉交互算法)。①

① 李宏汀，陈柏鸿，等. 触觉交互研究的回顾与展望[J]. 人类工效学，2008，14(3)：51-53.

在触觉机制的研究中，谢叻指出触觉在输入和输出的一大特点：触觉是唯一的既可以接受周围环境输入又可以对周围环境输出的感知通道。[①]触觉显示技术研究在18世纪初就已开始，但至今所取得的成就仍非常有限。触觉显示是应用触觉刺激表示信息，通过触觉来显示和传递信息[②]，其研究路径多通过分析触觉的生理特性、情感特性，进而分析触觉显示技术的多维性：多维触觉互动、多感官互动环境、多样情感互动[③]。

在触觉交互方式上，用户将从单点的力触觉加护，扩展到两点或分布式的多点、多自由度、多手指、多用户、多通道交互[④]，从而使得虚拟现实和真正现实之间的界限变得越来越模糊。除了在已有的虚拟手术和机器人遥控操作的应用之外，还可用于残疾人的力触觉康复训练、网上商品虚拟浏览等。[⑤]并引入手指套环和探针，被设计用来提供三维位置的感知和反馈。[⑥]将触觉交互及界面在如下领域中应用：1.远程操作、虚拟环境、虚拟现实和临场感；2.感官替代；3.研究不同触觉参数的实验原型；4.三维表面生成；5. Braille盲文；6.游戏。[⑦]

在盲人用户的研究领域，清华大学美术学院江宁在论文《关于触觉交互的辅助设备研究——盲人触觉交互设备设计》中通过盲人学校的实地访谈、盲人们的触觉认知实验和触觉显示器的设计，为盲人的触觉认知及交互研究打下了坚实基础。[⑧] 在此基础上，本课题组关于盲人的触觉交互体验[⑨]、触觉交互的发展方向和趋势[⑩]，以及触觉图形显示器的概念设计[⑪]等方面的

① 谢叻，张艳，等. 虚拟手术中的力学变形和力觉感知[J]. 医用生物力学，2006，21(3)：241-245.

② 喻耀华，刘正捷. 触觉显示的人机交互研究及应用[J]. 计算机科学，2008，35(11)：28-31.

③ 邱宏. 基于触觉显示技术的网络弹性材质界面研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.

④⑤ 张小瑞. 虚拟物体力/触觉交互算法的研究进展[J]. 系统仿真学报，2011，23(4)：627-642.

⑥ 吴兆卿. 触觉交互——一种新兴的交互技术[J]. 人类工效学，2006，12(1)：57-59.

⑦ 喻耀华，刘正捷. 触觉显示的人机交互研究及应用[J]. 计算机科学，2008，35(11)：28-31.

⑧ 江宁. 关于触觉交互的辅助设备研究——盲人触觉交互设备设计[D]. 北京：清华大学，2011.

⑨ 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图形显示器的交互体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2016，28(9)：1571-1576.

⑩ 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉交互的演进及未来趋势分析[J]. 中国计算机学会通讯，2016，12(3)：50-54.

⑪ 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图像显示器Graille设计研究[J]. 装饰，2016(273)：94-96.

前期研究成果对本书也起到了很好的支撑作用。

在目前国内业界领域,有很多盲人相关的触觉辅助设备,比如依托于清华大学自动化学院的“清华启明星”品牌,已设计开发了多款诸如盲文点显器、盲人 PDA 等盲人触觉辅助产品,在市场上拥有一席之地。

1.4.3 国外文献综述

国外关于触觉及触觉交互的研究相对领先于国内。电气和电子工程师协会在 2008 年开办了专门的触觉期刊(*IEEE Transactions on Haptics*);美国计算机学会的人机交互、用户界面软件与技术兴趣小组(ACM SigCHI/SigUIST)也有很多关于触觉的交互设计研究。

早在 20 世纪 60 年代,美国神经系统科学家 Paul Bach-y-Rita 在神经可塑性和感官替代领域就已取得进展,于 1968 年开发了“Tactile Vision Substitution System”(触视觉替代系统),并将成果发表于 1969 年 3 月第 21 期的 *Nature* 杂志上,引起了强烈反响。①

同时代,1969 年美国斯坦福大学电子工程系教授 John Linvill 研发了 Optacon 原型,成为第一台真正意义上的“动态触觉图形显示器”,并在随后进行了正式的商用市场化,造福了千万盲人。②

随后,德国 Metec 公司、日本 KGS 公司都先后进行了触觉图形显示器的尝试,并发表了多篇研究论文③④,本书将在第 3 章对以往关于触觉图形显示器的研究做归类和整理。

在触觉图像的研究方面,Thomas 提出了视觉图像向触觉图像的自动转换和生成,通过图像语义的自动分析生成图像轮廓,并使用微塑纸等材

① Paul Bach-y-Rita, Carter Collins, Frank Saunders, et al. Vision Substitution by Tactile Image Projection[J]. Nature, 1969, 8: 963-964.

② Linvill JG, Bliss JC. A Direct Translation Reading Aid for the Blind[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press, 1966, 54(1): 40-51.

③ Schweikhardt W, et al. Rechnerunterstützte Aufbereitung Vonbildshirmtext-grafiken in Eine Tastbare Darstellung[D]. Stuttgart: Stuttgart University Press, 1984.

④ Shimojo M, Shinohara M, Tanii M, et al. An Approach for Direct Manipulation by Tactile Modality for Blind Computer Users: Principle and Practice of Detecting Information Generated by Touch Action[M]//Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2004, 3116: 753-760.

料，以触觉的形式呈现。[1][2] 但其局限性是图像内容的表达方式没有做针对盲人用户的优化。

美国普渡大学教授 Hong Z. Tan 带领的触觉研究小组及 *IEEE Transactions on Haptics* 期刊也有多个相关的研究和论文发表，主要探索了人手及身体的触觉感知能力，包括对冷、热、大、小的感知[3]、对触觉和肤觉的幻觉[4]、对震动的感觉[5]和融合视觉和听觉的多通道研究[6]。

综合以上国内及国际的研究前沿及文献综述，目前还缺乏基于盲人用户的触觉认知及交互的系统研究，特别是针对互联网时代下图形图像的认知理解。另外，国内外的触觉图形显示器研究大多以昂贵的"压电陶瓷"技术为基础，并没有深度结合盲人学习和认知的特点，因此，目前还没有真正意义上广泛商用的触觉显示设备。这两个核心点也正是本书试图研究并给出设计方案的方向。

1.5 研究方法及本书结构

1.5.1 研究方法

面向盲人的触觉认知与体验的研究既属于设计学的人机交互设计及用户体验设计，又因为关注用户为盲人及其触觉的认知，包含了认知心理学、触觉心理物理学等领域，具有多学科交叉的特点。

---

① Thomas P. Way，Kenneth E，et al. Automatic Visual to Tactile Translation—Part Ⅰ：Human Factors，Access Methods，and Image Manipulation[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press，1997.03. Vol.5(1)：81-94.

② Thomas P. Way，Kenneth E. et al. Automatic Visual to Tactile Translation—Part Ⅱ：Evaluation of the TACTile Image Creation System[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press，1997.03. Vol.5(1)：95-105.

③ Lynette A. Jones，Hsin-Ni Ho. Warm or Cool，Large or Small? The Challenge of Thermal Displays[J]//Proceedings of the IEEE Transactions on Haptics. IEEE Press，2008.01. Vol.1(1)：53-70.

④ Susan J. Lederman，Lynette A. Jones. Tactile and Haptic Illusions[J]//Proceedings of the IEEE Transactions on Haptics. IEEE Press，2011.10. Vol.4(4)：273-294.

⑤ Seungmoon Choi，Katherine J. Kuchenbecker. Vibrotactile Display：Perception，Technology，and Applications[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press，2013.09. Vol.101(9)：2093-2104.

⑥ Rob Gray，Charles Spence，et al. EfficientMultimodal Cuing of Spatial Attention[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press，2013.09. Vol.101(9)：2113-2122.

本课题研究方法包括：文献综述法、实验分析法、比较研究法、深度访谈法、焦点小组和定性与定量相结合的方法。

（1）文献综述法：本研究针对交互设计、触觉交互、实体交互界面等设计领域，对盲人的触觉认知学、心理学等领域，以及计算机图形学、计算机视觉等领域的大量原始论文、数据、观点，进行分析、提炼、归纳和整理，为本书的理论和设计体系架构提供了重要的基础和支撑。

（2）实验分析法：本研究通过多次实验，量化研究触觉认知和交互的特点和影响认知的因素，为设计理论和设计实践提供了事实依据和支撑。

（3）比较研究法：本研究在辅助设备的研究中采用比较分析法，在重要参数上进行对比分析；并在定量实验时采用实验组和对照组，进行比较研究，从而得出更客观的结论。

（4）深度访谈法：盲人与明眼人在世界的认知方面存在着诸多不同，作为设计师，面向盲人用户的设计研究需要通过深度访谈法了解盲人朋友们在上网和图形图像学习等方面的生活现状和真实需求。

（5）焦点小组：在设计研究中，针对某个具体设计，需要采用焦点小组方法，与多位盲人用户进行深入的沟通与讨论，开拓设计人员的思考范围，并力求设计的正确性和有效性。

（6）定性与定量相结合：在盲人用户的触觉认知试验中通过定量研究与定量对比，得出盲人触觉认知的特点和影响因素，提供设计支撑。同时在设计过程中，盲人用户的需求、习惯和交互方式都是复杂的、开放的、非线性的体系，这些因素不能通过预设某种数量关系来全面反映研究对象的性质、意义和问题。因此在设计深入的过程中引入定性研究，采用定性与定量相结合的研究方法。

1.5.2　本书结构

基于以上的研究内容、文献综述和研究方法，本书共分为七个部分，各章节具体内容如下：

第 1 章为引言部分。主要介绍了本研究的选题背景、研究内容、研究意义、创新点、研究方法和本书主要框架。

第 2 章为触觉交互设计的理论基础和研究路径。从触觉的生理、情感和心理方面分别剖析，为将触觉作为主要交互方式的认知和交互体验设计提供坚实的生理、情感和心理基础。然后论证触觉在信息与交互设计中的可行性和必然性，并综述与触觉相关的交互设计的发展和未来方向：自然

交互、多通道交互和实体交互。最后确定本书接下来的研究路径。

第 3 章以盲人用户为核心，首先通过人类学研究方法理解盲人群体的生活环境、遇到的障碍和相关的需求。然后以盲人触觉为研究重点，整理过往有代表性的盲人触觉辅助设备。针对盲人的迫切需求——读懂网上的图形图像，本章进行详细的触觉认知的研究。通过三个实验，得出盲人触觉认知的特点和关键因素，并给出设计建议。

第 4 章以用户体验的角度进行设计分析。首先概述体验，然后分析触觉体验的本质和特点。再基于第 3 章的研究结论，重点分析盲人触觉交互体验的特征和影响因素，为下一章的设计体系提供设计导向。

在前 4 章的基础上，第 5 章提出基于盲人用户体验的触觉交互设计理论与方法，通过设计原则、设计目标、设计要素和具体的设计方法，构建一套相对完整的设计体系，作为方法论的研究。

第 6 章将文献研究、用户研究、用户实验、理论分析的成果应用于实践，设计并开发相对低成本的盲人触觉图形显示终端。从现状与需求分析入手，使用以用户为中心、用户参与式的设计，以及功能与场景设计、信息框架及交互设计、模块与结构设计，最终进行原型设计和开发，对盲人触觉认知及交互体验设计研究做实践验证。

结论部分梳理全书，强调研究成果和创新点，同时点出本研究的不足，为未来更深入的研究提供参考方向。

本课题的研究思路和研究框架如图 1.5、图 1.6 所示。

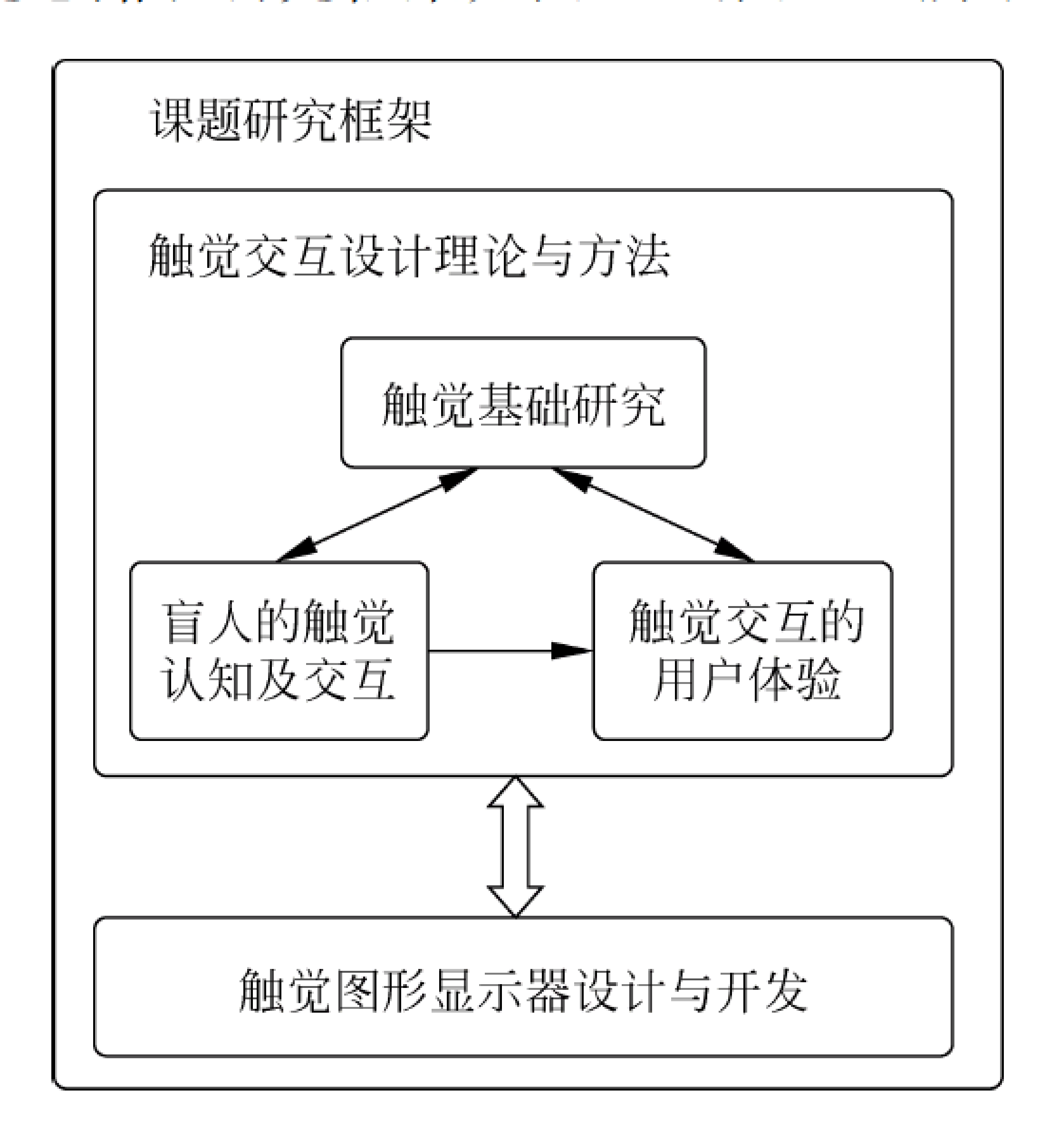


图 1.5　研究思路

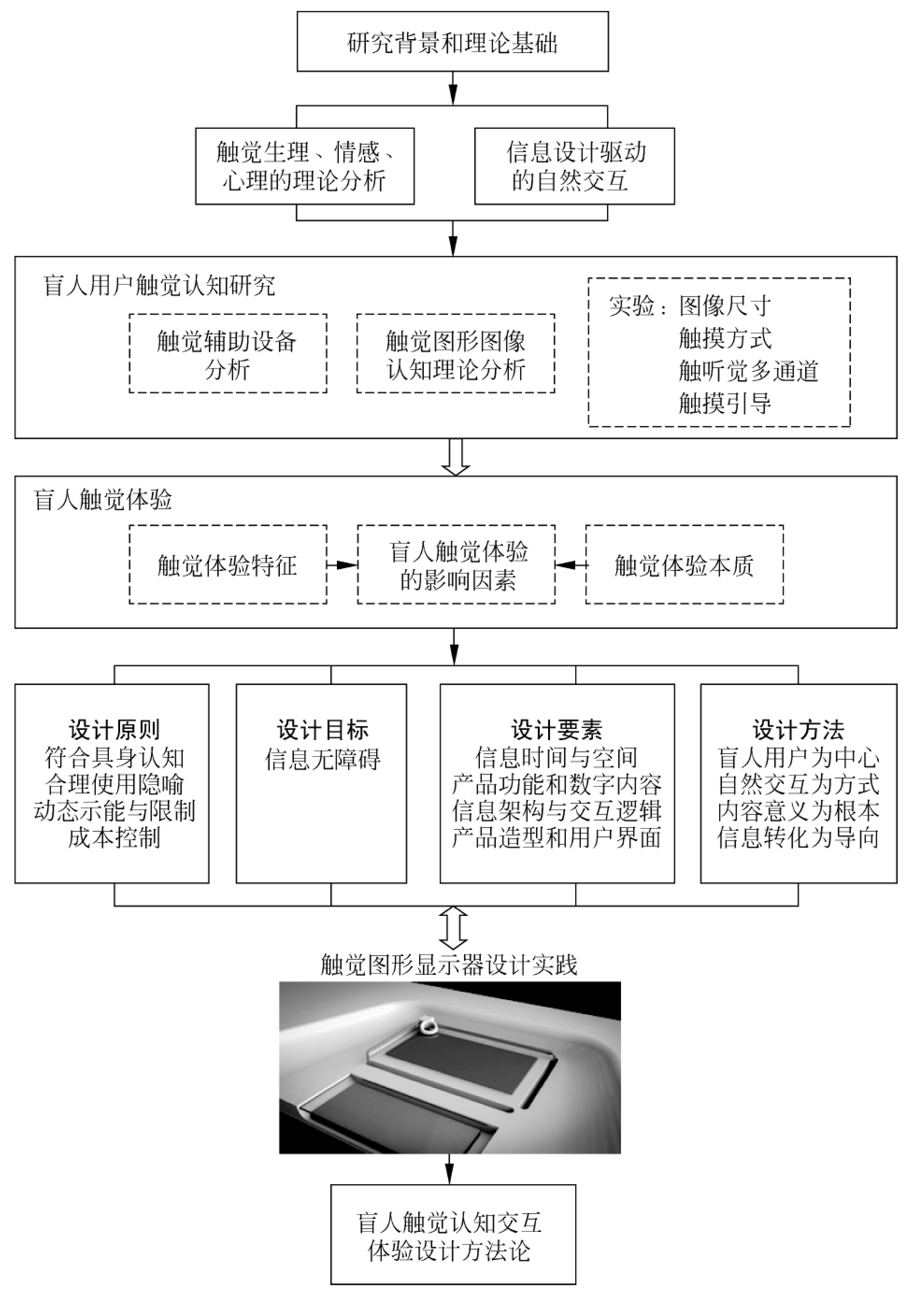

研究背景和理论基础
触觉生理、情感、心理的理论分析
信息设计驱动的自然交互
盲人用户触觉认知研究
触觉辅助设备分析
触觉图形图像认知理论分析
实验：图像尺寸
触摸方式
触听觉多通道
触摸引导
盲人触觉体验
触觉体验特征
盲人触觉体验的影响因素
触觉体验本质
设计原则
符合具身认知
合理使用隐喻
动态示能与限制
成本控制
设计目标
信息无障碍
设计要素
信息时间与空间
产品功能和数字内容
信息架构与交互逻辑
产品造型和用户界面
设计方法
盲人用户为中心
自然交互为方式
内容意义为根本
信息转化为导向
触觉图形显示器设计实践
盲人触觉认知交互体验设计方法论

图 1.6 研究框架

第 2 章　触觉交互设计的理论基础和研究路径

“我觉得自己漂浮在床上，却又感受不到床的存在，我发现自己偶尔坐了起来，但马上又倒下了——因为我感受不到身体。”

——*Ian Waterman*

19 岁那年，一种罕见的神经系统疾病夺去了 Ian Waterman 脖颈以下的全部触觉和对肢体空间位置的感觉。Ian 知道损坏的神经无法复原，只能绕过它们，寻找一种新方式控制自己。他穷尽所能来观察、记忆、练习身体的动作。普通人下意识就能自然完成的动作，对 Ian 来说都离不开双眼观察和头脑思索，从而让一系列指令精确执行。一年后，虽然如木偶般踉跄，虽然他总要低着头观察脚步的移动，但 Ian 终于又能站起来走路了。Ian 对抗命运的故事被写进了 *Pride and a Daily Marathon*[①] 一书，以及纪录片 *The Man Who Lost His Body*[②] 中。

触觉是人身体中最基础的知觉，每一次触觉的使用都如此自然和不经意。而 Ian 的例子表现了人在失去触觉时所面临的种种一般人难以想象的问题和困难。此后，大批学者加入对触觉物理、生理和心理的研究，为基于触觉的交互设计提供了理论支撑和准则。

如第 1 章所叙述，作为一种与视觉、听觉等并列的感官通道，触觉在现代人机交互的研究中具有重大理论和应用价值。因此，在第 1 章文献综述的基础上，本章先梳理触觉的生理、情感和心理三个方向的分析，然后论证触觉在信息交互设计中的可用性，以及与触觉相关的交互界面的发展和前景，从而得出触觉交互设计的理论基础和研究路径。

---

① Jonathan Cole，Ian Waterman. Pride and a Daily Marathon[M]. Cambridge：the MIT Press，1995.

② Producer：Emma Crichton. Director：Chris Rawlence. The Man Who Lost His Body，1997.

2.1 触觉的生理解析

触觉是人体皮肤受外界刺激所产生的感觉。我国对人体感觉的描述可以追溯到战国时期《荀子・正名》,该文体现了荀子对形体感觉的"名"与客观存在的"实"的对应关系。其中身体感觉的部分为:"……疾、养、沧、热、滑、铍、轻、重以形体异……",即疼痛、痒、冷、热、光滑、金属涩、轻、重等身体感觉的差别。人之所以能有如此丰富的触觉感觉,是由人的生理特性决定的。生理信号在大脑中处理,进而产生人触觉的心理感觉和情感的变化。

在现代触觉理论下,触觉(haptic sensing)既包括皮肤被动感受到的外界刺激感觉(tactile/cutaneous),也称作肤觉,亦包括皮肤内的肌肉因内在控制或外力驱动而发生了伸缩或扭曲等形变而产生的感觉(kinesthetic/proprioception),又叫肌肉运动知觉或本体感觉。而交互研究专业在学术上将触觉系统(haptics)分为触觉感觉(haptic sensing)和触觉操作(manipulation),即通过触觉的输入和输出。图 2.1 为触觉系统的分类。

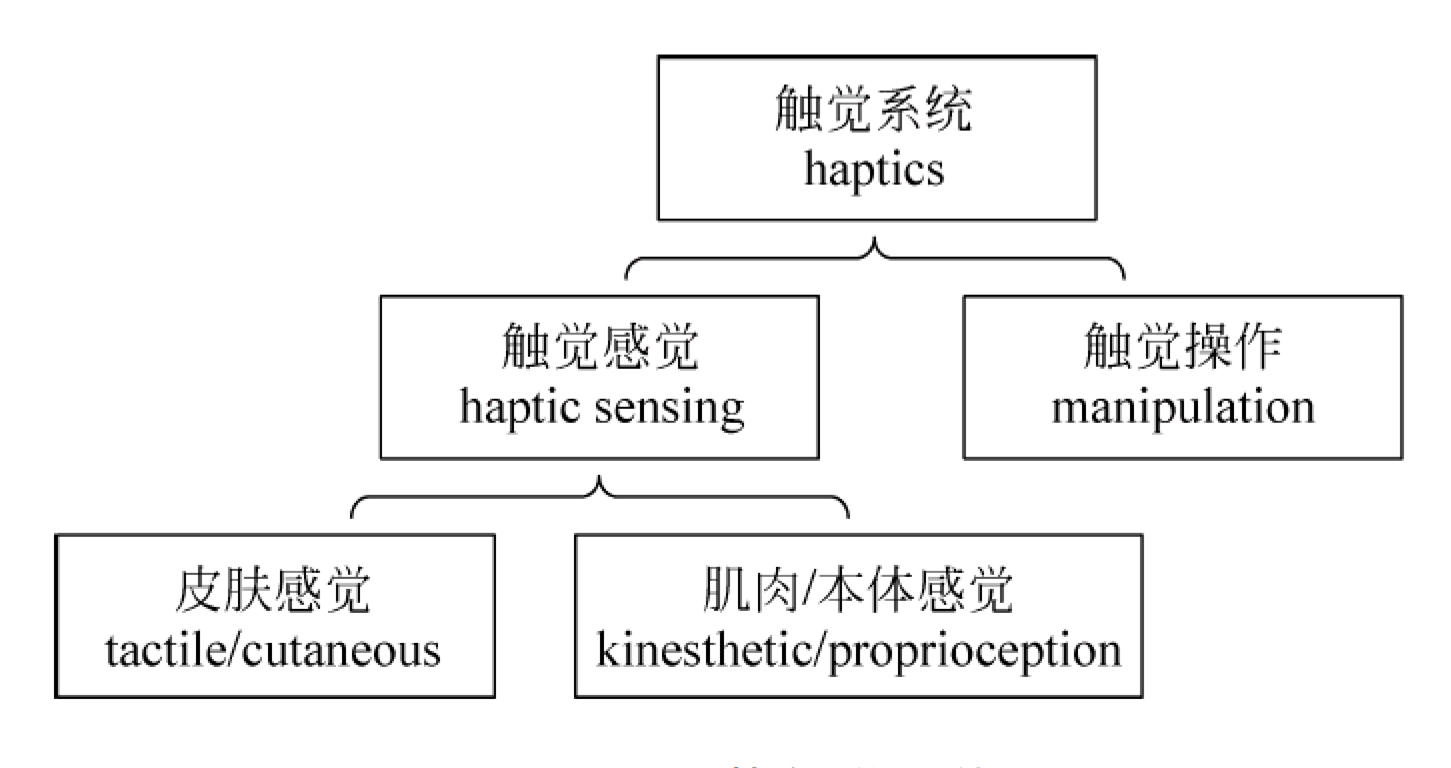


图 2.1 人体触觉系统

2.1.1 皮肤的触觉感受器

从生理构造上看,人体皮肤的面积远大于其他感官。皮肤由表皮、真皮和皮下组织组成。如图 2.2 所示,在皮肤中包含了四种触觉感受器,又叫触觉小体:麦斯纳小体(Meissner's corpuscles)、麦克尔盘(Merkel cells)、鲁菲尼终末(Ruffini endings)和环层小体(pacinian corpuscles)。其中麦斯纳小体和麦克尔盘作为触/压觉感受器在表皮内,鲁菲尼终末在真皮内,环层小体在皮下组织内。[①]

① Bruce Goldstein. Sensation and Perception[M]. Belmont: Wadsworth Publishing, 2002: 5-11.

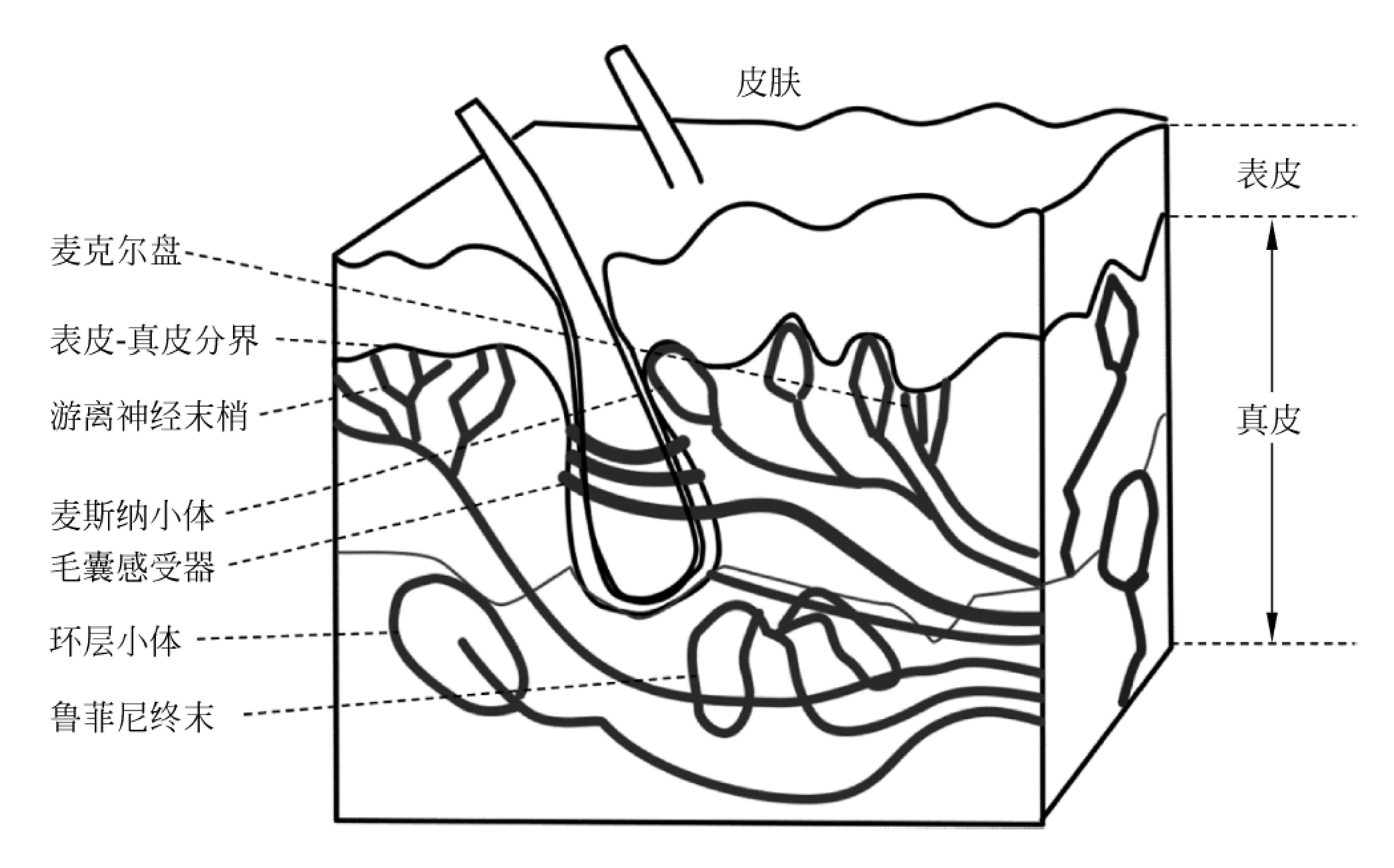


图 2.2　人体皮肤触觉感受器的分布①

以上四种触觉感受器提供了人皮肤的触觉感觉，而每一种触觉感受器又有独特的性质：

- 麦斯纳小体由 Johansson 和 Vallbo 于 1983 年发现，又称为 FA1(fast adapting Ⅰ)或 RA(rapid adapting)，因为麦斯纳感受器可以对精细区域内的快速响应进行反馈，其响应频率可达 20.40Hz；
- 麦克尔盘由 Knibestol 和 Vallbo 于 1970 年发现，又称为 SA1(slow adapting Ⅰ)，因为麦克尔盘感受器负责慢速静态的触觉反馈，且在四种感受器中，它的触觉感受精度最高；
- 环层小体由 Vallbo 和 Johansson 于 1984 年发现，又称为 FA2(fast adapting Ⅱ)或 PC(pacinian corpuscles)，因为环层小体负责对较大、较模糊区域的快速响应做出反馈，响应频率可达 250Hz 以上。因此环层小体对震动感觉最敏感；
- 鲁菲尼终末由 Johnon 于 2001 年发现，又称为 SA2(slow adapting Ⅱ)，因为鲁菲尼终末感受器负责较模糊区域的慢速静态触觉反馈。

四种触觉感受器的特性对比如图 2.3 所示。坐标系中的折线代表外力刺激人体表皮皮肤的位移变化，横坐标上的短纵线表示该触觉感受器的反馈。可见四种感受器是根据快速/慢速和高精度/低精度分类的。

① Bruce Goldstein. Sensation and Perception[M]. Belmont: Wadsworth Publishing, 2002: 5-11.

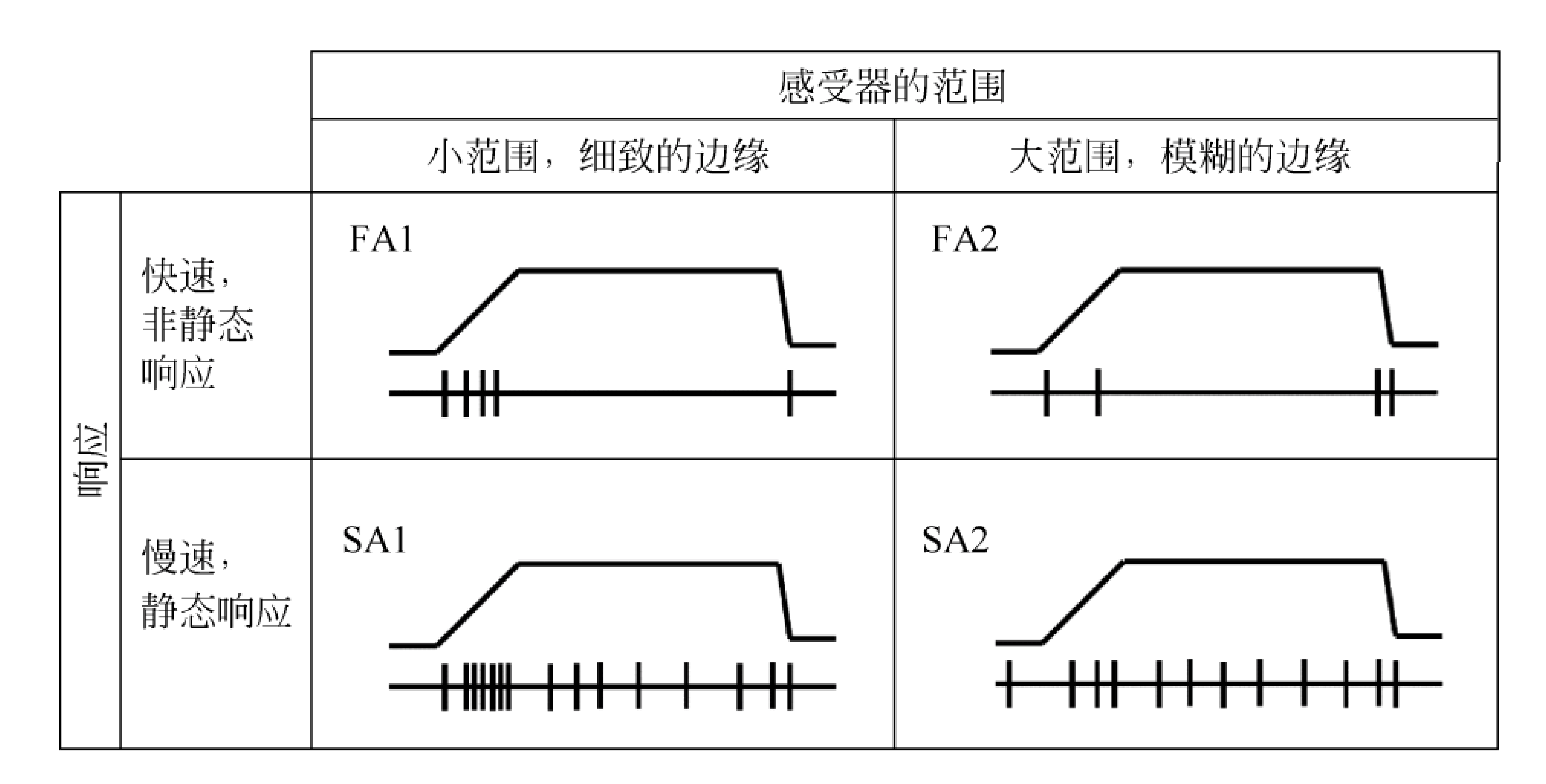


图 2.3　四种触觉感受器的特性比较[①]

图 2.4 揭示了四种感受器在触摸精细的触觉信号时不同的反馈结果。由于所触摸的布莱尔盲文点间距为 2.5mm，从该实验看，SA1 可以完整区别出每个盲文的内容，精度最高。FA2 精度最低，只能有大范围的粗略信号。所以人体皮肤可感受到的触觉感觉是四种感受器协同工作的结果。

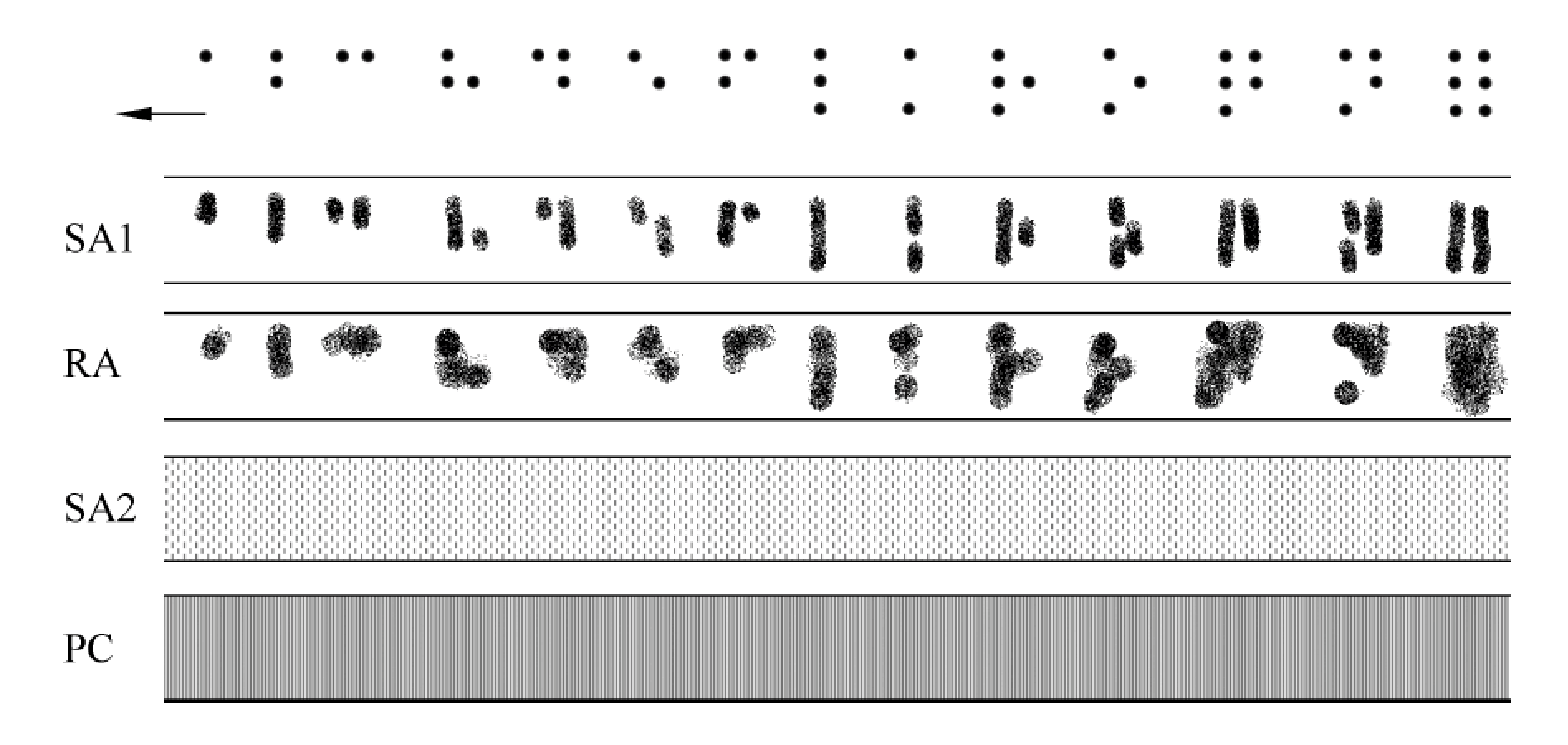


图 2.4　四种感受器对布莱尔盲文的触觉信号响应[②]

2.1.2　温度感受器

触觉系统的感受器除了包括外界的机械位移产生的触觉刺激，还包括

①② Lynette A. Jones，Susan J. Lederman. Human Hand Function[M]. Oxford：Oxford University Press，2006.

温度信息的获取和传递。皮肤内有两种温度感受器：冷感受器和热感受器，都位于表皮和真皮的神经末梢中。冷感受器所占比重更大，负责5.43℃区间的温度检测，且针对平均温度为 25℃的室温环境起主要的温度检测作用。相比之下，热感受器负责 28.47℃区间的温度检测。[①] 冷、热感受器的温度覆盖范围见图 2.5。

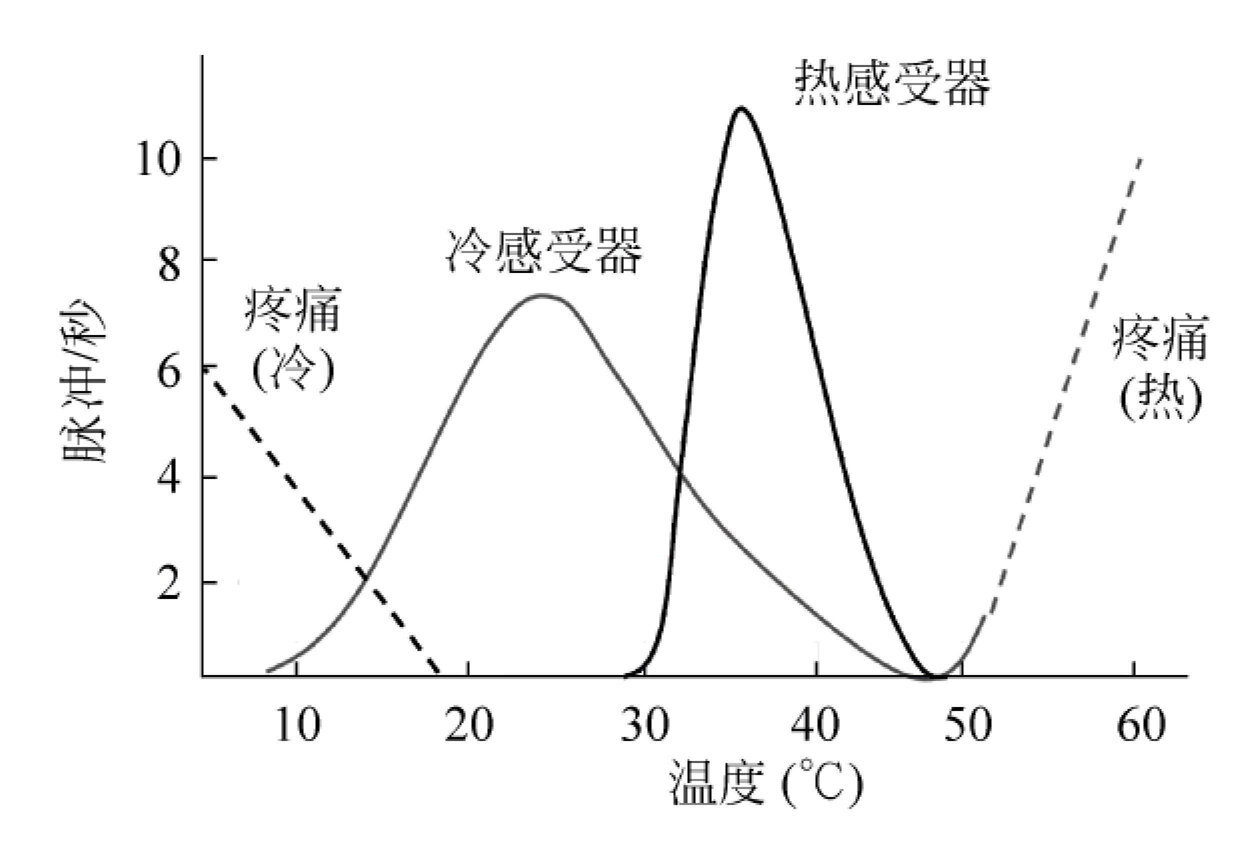


图 2.5　冷、热感受器的温度覆盖区间[②]

如图 2.5 所示，两种感受器在相应的活跃温度区间内提供温度感知反馈。而在温度区间外，即过冷或过热时，其相对的热、冷感受器则会触发疼痛反馈。具体而言，温度低于 10℃时，热感受器会因为寒冷而疼痛，温度高于 50℃时，冷感受器会因为炎热而疼痛。

2.1.3　痛觉感受器

表皮的传入神经单元中还包含痛觉感受器，专门负责对如痛觉的高强度刺激的反馈，其形式包括电刺激、机械刺激、化学刺激和过冷或过热的刺激。痛觉是对人体的一种保护机制，提醒人是否处于危险之中。在触觉交互设计中，一般不将痛觉介入日常交互。

2.1.4　肌肉及关节感受器

除了人体表皮的触觉感受，人的触觉系统还包含肌肉运动知觉或本体

① Lynette A. Jones，Susan J. Lederman. Human Hand Function[M]. Oxford：Oxford University Press，2006.

② Bruce Goldstein. Sensation and Perception[M]. Belmont：Wadsworth Publishing，2002：5-11.

感觉，而肌肉和关节神经系统的感受器承担着本体感觉的刺激响应。肌肉中有主要和次要两种感受器，位于肌肉纺锤体外的纤维和肌肉跟腱。肌肉在运动时，中心区域被拉伸，主要和次要感受器会感受刺激并做出响应。

人体在关节处同样包含触觉系统，比如鲁菲尼终末、高尔基终末、换层包裹终末和自由神经终末。这些感受器也分为快速响应和慢速响应，针对人体的关节运动给予响应的触觉反馈。

肌肉及关节感受器连同身体运动系统，将感受信号和运动信号与人体大脑做信号的输入、处理和输出，因此构成了人体的本体感觉系统（kinesthetic sense）。

2.1.5 人体表皮的触觉敏感度分布

触觉系统遍布人体的表皮。人体表皮面积有多种计算公式。我国按年龄组实测的结果表明，采用 Stevenson 公式 $S(\mathrm{m}^2)=0.61\times H(\mathrm{m})+0.0128\times W(\mathrm{kg})-0.1529$ 来计算我国 6 岁以上人群的体表面积更具准确性，并得到学术界公认[①]，因此我国成年人表皮面积在 1.5～2 m^2 左右。

人体中皮肤各个部位的触觉灵敏度是不同的。人体双手的触觉最容易被利用，因为手部皮肤的肤觉感觉神经分布较多，尤其是手指尖部等末梢的触觉非常敏锐，以及手、手臂和躯干拥有一体化的运动感知能力。四种触觉感受器在手部皮肤的分布遵循一定规律。手指末梢分布着密集的 SA1 和 FA1，用于捕捉细微的触觉信息。其他手指和手掌部分可以感受到大范围的触觉信息以及震动信息。

2.2 触觉的情感解析

触觉与人的情感关联密切，通过触觉通道获取的实体或抽象信息会对人的情感有较强的作用，即触觉的情感表达。更进一步地，针对触觉承载的信息，用户通过其他通道也能传达触觉的情感和功能。

2.2.1 触觉的情感表达

不管从被触摸物体的材质、软硬、纹理等维度，还是从人体的本体运动

① 王新荣，王平基，孙伟. 中国人体体表面积计算图[J]. 白求恩军医学院学报，2011，1：39-40.

感觉，触觉都会对人的情感有较强的影响。比如我们抚摸毛绒玩具，会得到相对温暖柔软的触觉感受，令人心情放松、愉悦；触摸锋利的军刀，金属的冰冷和刀刃的锋利会让人产生紧张的感觉；再比如触摸到过冷、过热，或压力极大的物体，会触发人体的痛觉，带来相应的负面情感。通常，针对实物的触觉情感表达维度有触觉质感、温度和重量几个方面。①

（1）触觉质感

质感是物体通过表面呈现、材料材质和几何尺寸传递给人的对实体的感官判断，通常通过视觉和触觉表达。第一，材料的材质和其固有属性对触觉质感起重要作用，这是由材质的元素种类、分子构成和排布方式决定的。比如材质的软硬：毛绒玩具令人感到温柔、舒适，砖石则会感到坚硬、刚强，如图 2.6 所示；以及材质的摩擦特性：瓷器摸起来光滑、细腻，橡胶摸起来生涩、硌手，如图 2.7 所示。



图 2.6　材质的软硬比较：毛绒玩具和砖石



图 2.7　材质的摩擦特性比较：瓷器和橡胶

① 姚彩，陈功，高西美. 基于视触觉的产品情感表达研究[J]. 美与时代，2011，1：82-83.

第二，触觉质感与实体的表面呈现和处理方式有关，主要受表面的打磨、粗糙度，以及是否被其他材料（如油漆等）涂覆决定。比如同样材质的木料，未经打磨的一面会凹凸不平，触摸感觉粗糙、扎手，经过打磨后会变得平滑和舒适。或者经过油漆涂覆后，会覆盖掉原本材料的表面纹理，触摸质感部分地被涂料的触感替代。图 2.8 对比了原始木料和打磨加工后的质感效果。



图 2.8 材质的表面处理对比：原始木料和打磨加工后的质感效果

第三，将材质的表面处理外延，则为实体的几何尺寸。不同尺寸形状的物体也有触觉质感的差异。比如三角形的物体会让人感觉稳定、尖锐；圆形的物体则让人感觉圆滑、舒适。

（2）温度

人的触觉包括温度感受器，触摸不同温度的物体也会产生相异的情感体验。通常情况下，温暖的触感让人感觉温暖、放松、愉悦；清凉的触感让人感觉冷漠、清醒、理性。①

除了物体及所在环境的真实温度，人在情感上还存在物体的触感温度。这是由用户的生活经验和主观感觉决定的。而触感温度往往由材料和物体类别决定，比如木材、塑料、橡胶、织物、皮革等材料导热性差，触感比较温和；金属、玻璃、陶瓷灯材料导热性较好，触感变化会比较剧烈。② 触感温度有着广泛的应用，人类社会和人类行为会受触感温度的影响。比如在高纬度的国家和地区，由于日常气候相对寒冷，人们在家居选择上会更偏爱温暖

①② 姚彩，陈功，高西美．基于视触觉的产品情感表达研究[J]．美与时代，2011，1：82-83．

温馨的家居和布置，木材家具会更受欢迎。[①] 相对地，生活在我国南方地区的人们喜欢使用竹子等清凉的材料编织竹席，或使用金属、大理石等材料的家居，在炎炎夏日避暑。

（3）重量

最后，物体的重量也影响着用户的情感。通常来说，较轻的物体拿起来会更随身、便捷，联结在情感上，会让人感觉轻快、怡人；较重的物体则会感觉厚重，在情感上会更有分量。比如在目前移动互联网潮流中手机重量的设计。有的手机重 130～150g 左右，用户会感觉使用方便、轻快，而有的手机重量在 200g 以上，一部分用户会不能接受这个重量，但它厚实、厚重的感觉也会吸引另一部分用户群体。因此手机重量的差异对应着不同情感需求的用户。

2.2.2　触觉情感的多感官传达

触觉情感不仅通过触觉表达，基于用户的生活经验和先验知识，触觉情感还可以通过多感官的方式向用户传达，比如最常用的视觉通道。当用户通过视觉看到被设计的实体时，该实体的表面信息，如所见的材质、颜色、形状等，即可传递一部分该实体意欲传达的触觉情感。[②] 比如上文中图 2.6、图 2.7、图 2.8 所进行的对比分析，观者即可通过视觉体会这些实体的触觉情感，实现“通感”的情感传达。更多地，在这里本书以著名设计师原研哉先生的设计作品作为典范，进行分析。

在日本梅田医院的导视系统中，设计师原研哉使用易拆洗的白色棉质外套，将导视牌设计成袜子或床单的样子，有些还用柔软物填充。观者不需要刻意地触摸，就能感受到温暖、柔和的感觉。设计师将棉布和柔软填充的触觉特性和情感通过设计，以视觉导视平台呈现出来，实现了触觉、视觉的通感，传达出一般的导视标识所不具备的触觉情感和亲和力。

对于银座松屋大楼的外墙壁的设计，原研哉设计师采用了“肌肤相亲”的设计理念，在外墙壁上规则而紧密地排列了很多凸起的小圆点，配以灯光的照明，照射出大量的微粒，向银座大街辐射，并与大楼交相辉映。严格地说，大楼外墙与人们用手触摸并无太大关系，但充满凸点的外墙使人们联想

---

① 姚彩，陈功，高西美．基于视触觉的产品情感表达研究[J]．美与时代，2011，1：82-83．

② Norman DA．Emotional Design：Why We Love（or Hate）Everyday Things[M]．New York：Basic Books，2004．

到柔软、温暖的感觉，衬托出优美的质感。与此异曲同工的例子还有著名的国家游泳中心“水立方”建筑。“水立方”的外墙设计非常新颖独特，由细胞排列形式和肥皂泡天然结构设计而成。人们看到此建筑时会产生触摸它的意愿，并从视觉上和触觉上带给人们可爱、俏皮、柔软的情感。

由此可见，通过视觉通道传达的触觉情感，实为触觉给人的一种抽象的经验反映，是触觉符号和情感的视觉化表达。

除视觉外，触觉情感还能通过听觉、嗅觉等感觉表达，但也都依托于人对该物体触觉的生活经验和先验知识。比如凉席所散发的特有的清香，会让人联想到与凉席接触的清凉爽快；听见风铃清脆悦耳的声音，会让人感觉到它精致、温和的铃铛。

2.3 触觉的心理解析

触觉作为一种生理感觉，与心理有直接的联系。1879 年，冯特在德国莱比锡大学创立了世界上第一个心理学实验室，标志着心理学成为一门独立的学科。而我国心理学从西方逐步移植而来，这种移植过程已达百年之久，至今仍未结束。与此同时，德国物理学家费希纳致力于探究生理方面和心理方面之间的函数关系，以精确地表达它们之间整体的相互依赖性[①②]，并开创了心理物理学。

2.3.1 心理物理学概述

众所周知，人的感觉器官受到某种外界刺激时，人在主观上会有相应的感觉。但如何定量测量这种感觉的强度？人主观上产生的心理感觉与客观上受到的刺激呈现何种关系？事实上，我们的心理是生理的一个关联函数，反之亦然，它们之间存在一种恒定的关系，这种关系使我们能从一者的存在和变化推知另一者。

心理物理学致力于研究测量心理过程的强度。与物理过程（物理过程是外在的、公开的、客观的、可以进行直接测量的）不同，心理过程是内在的、隐秘的、主观的、不能进行直接测量的。心理物理学是一门探讨身心相互依

---

① Fechner GT. Elemente der Psychophysik Ⅱ[M]. Leipzig: Breitkopf & Hartel, 1860.

② 古斯塔夫·费希纳. 心理物理学纲要(一)[M]. 李晶，译. 北京：中国人民大学出版社，2015.

存关系函数的精确科学，从更为一般意义上说，它是一门关于身体世界与心理世界、物理世界与心理世界之间关系的精确科学。[①]

作为心理物理学的创始人，费希纳的《心理物理学纲要》分为两卷，第一卷为《外部心理物理学》(*Outer Psychophysics*)，主要研究刺激与感觉之间的关系；第二卷为《内部心理物理学》(*Inter Psychophysics*)，主要研究大脑过程(神经兴奋)与感觉之间的关系。心理物理学必须建立在心理学的基础上，另一方面也要给心理学提供数学基础。外部心理物理学从物理学中借用辅助工具和方法论，内部心理物理学则更多地倾向于借助生理学和解剖学的知识，特别是神经系统的知识。

费希纳晚年在《心理物理学的修正》(1882)一书中指出，心理测量只有在外部心理物理学领域才有可能进行。因此，外部心理物理学是确切阐释支配身心之间函数关系精确的、量化的规则不可缺少的前提条件。尽管没法回避心理测量，但它仅仅只是一种工具，从本质上说并不是一个目标。外部心理物理学仅仅只是“生理学的一个微不足道的附属物”[②]，真正的心理物理学是内部心理物理学。但事实上，《心理物理学纲要》的第二卷鲜有研究，也没有通用的英文译本。费希纳的主要成就在于第一卷中，开创了外部刺激与人体感觉的对应函数关系。

2.3.2　触觉心理物理学实验及结论

关于外界刺激与心理量度的关系，通常通过心理学实验进行推测和总结。心理强度的相对增强可以根据其所需身体能量的相对提高来进行测量。费希纳与韦伯在这两者的关系上有如下的数学描述与概括：

许多感觉系统中，刺激(R)的最小可觉差是一个固定比例，我们能注意到一个刺激的比例变化，而不是该刺激强度增加或降低的绝对值。

$$\Delta R/R = C$$

其中：ΔR：差别阈限

R：刺激的强度水平

C：固定比例，即常数

费希纳在此基础上提出，刺激量按几何级数增加，而感觉量按算数技术

---

① Fechner GT. Elemente der Psychophysik Ⅱ[M]. Leipzig: Breitkopf & Hartel, 1860.

② Fechner GT. Revision der Hauptpunkte der Psychophysik[M]. Leipzig: Breitkopf & Hartel, 1882: 262.

增加，并进一步推导出一个对数公式。

$$S = k\log R$$

其中：S：感觉到的刺激量

R：实际刺激强度水平

k：常数

我们称之为“韦伯定律”“费希纳定律”或“测量的基本公式”。

第二，人的触觉存在“最小可觉差”，即外界刺激量达到一定比例时，人才能在心理上感知出来。触觉系统中，力的大小、本体运动的变化、移动角度等都有最小可觉差，通过多角度的触觉心理实验得出，触觉系统的最小可觉差通常在5%～15%之间。

人们皮肤的生理学特性决定了触觉在图像感知上所受到的限制。人利用手指尖的皮肤能够辨别出的两个刺激点之间的最小距离，是手指(主要是食指尖)的触觉感受性的一种指标，用触觉器测量。[①] 辨别阈实验是1968年 Weinstein 公布的数据，通过使用两根细小的针对手指头皮肤进行刺激，询问被试是否有感觉到是两个点在刺激他(如图2.9所示)。在实验中，盲人比明眼人分辨能力更强。明眼人一般为2.2～2.5mm，而盲人一般为1.3～2mm。由此可见，触觉的感知分辨率比视觉的要低得多。因此，可以认为触觉图像要求在触觉刺激上形成的对比，比视觉要求的更大。经过多年训练，盲人的手指触觉两点阈值可以更小，极限可达1mm。教育过程中注意

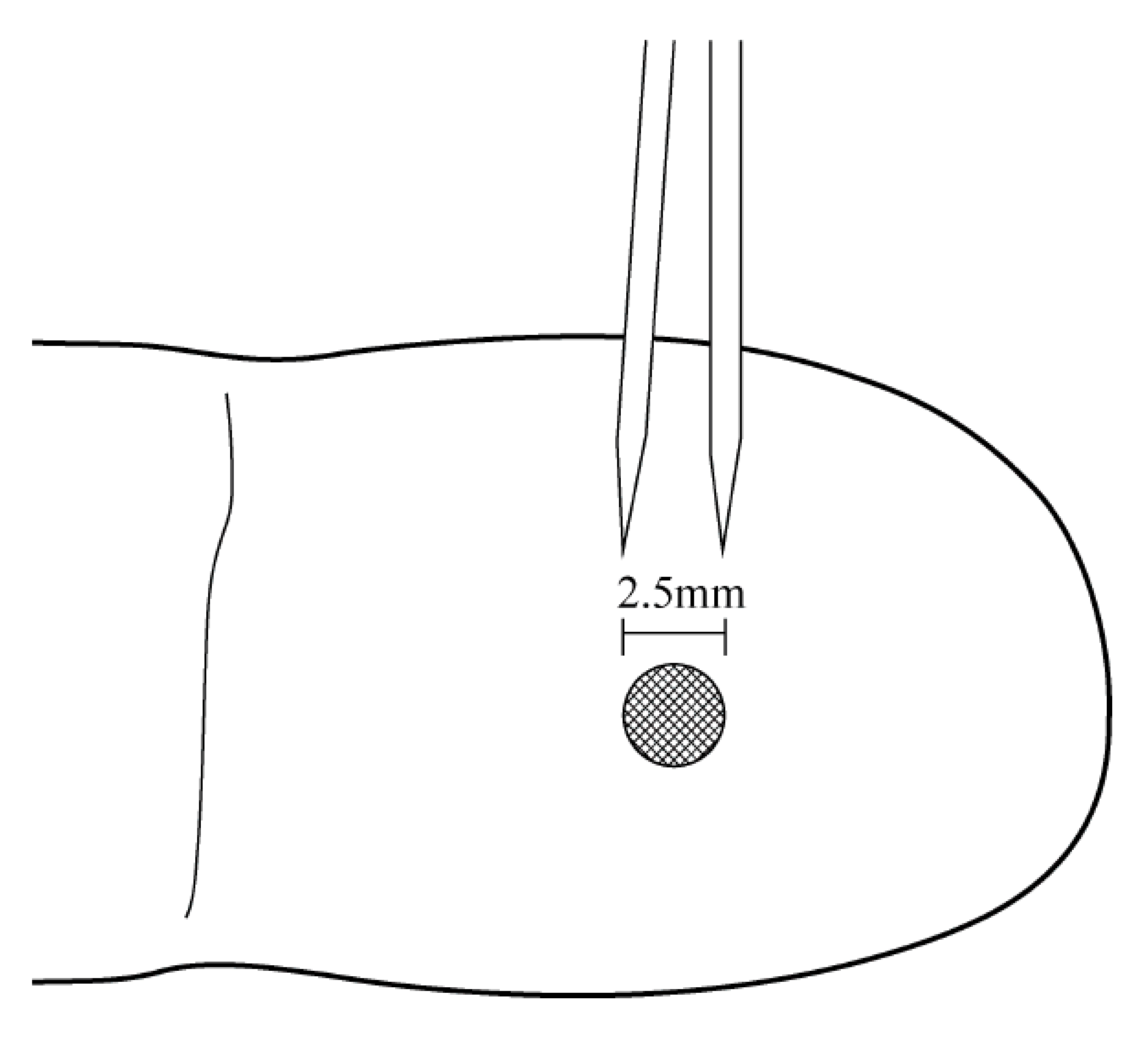


图2.9 触觉分辨率

① 39健康网. 盲人敏锐的触觉[OL]. http://eye.39.net/yb.

训练盲童的触觉，提高其触觉敏锐性，不仅有利于他们顺利摸读密密麻麻的盲文，而且也有利于他们辨别物体的细小特征，为他们认识周围世界，更顺利地学习和生活创造条件。[①]

在盲文设计时，因为要考虑所有用户都能较容易地辨别盲文触点，点间距过小的话，会造成一部分用户触摸困难，因此盲文点间距选用了人普遍都能区分的 2.5mm。

2.4　触觉引入信息交互设计

通过上文的分析可以得知：触觉系统具有丰富的肤觉感受能力和本体运动感受能力，还具有四肢的操作控制能力；触觉与人的情感息息相关，不同的触觉感受会带来相异的情感；触觉作为直接的本体感觉，外界的触觉刺激与人的心理感觉呈现了规律的函数对应关系。

自人类诞生起，便开始探索外界环境，并与环境产生相互作用。从最原始的与自然环境的交互，逐渐发展到与简单工具的交互，与机械工具的交互，与机器设备的交互，与电力设备的交互，以及与电子信息的交互。或者说，从与自然物体的交互，到实体设备的交互，发展到虚拟数字信息的交互。而在互联网时代的今天，虚拟数字信息扮演着越来越重要的角色，借助显示屏和多媒体设备，视觉和听觉通道在与数字信息交互中承担了主导作用，而触觉在日常的信息交互时作用相对有限。

相比视觉和听觉，触觉是唯一同时包含输入和输出能力的通道。然而相比视觉和听觉，触觉在单位时间内可接收并处理的信息量小于听觉通道，更小于视觉通道。触觉拥有独特的生理、情感和心理特性，在信息交互中发挥着不可或缺的作用。如何对此进行有效的设计，如何采用最佳的表达方式传递信息，是信息与交互设计需要研究的问题。

2.5　交互界面演进与多通道交互趋势

将触觉引入信息交互设计，离不开信息交互技术的发展和信息交互界面的演进。通过信息交互发展脉络的整理，我们可以得出多通道交互的趋

① 39 健康网. 盲人敏锐的触觉[OL]. http://eye.39.net/yb.

势。同时本节针对实体交互界面(TUI)、虚拟现实(VR)等快速发展的交互界面着重分析，论证触觉在现代信息交互中越来越重要的作用和意义。

2.5.1　信息设计驱动的自然交互

在计算机被发明以前，人与自然、工具及设备都存在操作与反馈，即实体信息的输入和输出。随着计算机和数字信息的出现和广泛使用，交互设计更多地指向面向虚拟时空的信息交互。虚拟时空和传统实在的物理时空的区别是交互设计有别于传统设计的根本所在。传统设计的时空基于传统物理学时空，是几何的、绝对的、客观的、稳定的、线性的；而交互设计的时空摆脱了物理规律的舒服，是逻辑的、关联的、关于行为的、动态的、非线性的。[①]

人机交互设计的发展历程归纳如下：

- 1959 年，B. Shackel 提供了人机界面的第一篇文献《关于计算机控制台设计的人机工程学》；
- 1960 年，Liklider JCK 首次提出“人机紧密共栖的概念”，被视为人机界面的启蒙观点；
- 1969 年，召开第一次人机系统国际大会；
- 1969 年，第一份专业杂志《国际人机研究》(UMMS)创刊；
- 从 1970 年到 1973 年出版了四本与计算机相关的人机工程学专著；
- 1970 年成立了两个相关的研究中心：英国拉夫堡大学的 HUSAT 研究中心，美国 Xerox 的 Palo Alto 研究中心；
- 20 世纪 80 年代开始，从人机工程学独立出来，更加强调认知心理学以及行为学和社会学等学科的理论指导，实践方面，从人机界面拓延开来，强调计算机对于人的反馈和交互作用，“人机界面”逐渐被“人机交互”所取代。
- IDEO 创始人比尔·莫格里奇在 1984 年明确提出了“interaction design”的用语和概念；
- 20 世纪 90 年代中期，人机交互的研究重点放到了智能化交互、多模态(多通道)、多媒体交互、虚拟交互以及人机协同交互等方面，也就是“以人为中心”的人机交互技术方面；[②]

---

① 张烈. 以虚拟体验为导向的信息设计方法研究[D]. 北京：清华大学，2008.

② 互联网博物馆. 交互设计-科技中国[OL]. http://www.techcn.com.

- 21 世纪以来，基于语义识别的智能化交互逐步进入商用，多模态“沉浸式”交互，如虚拟现实（VR）、增强现实（AR）步入新的阶段。

随着人机交互设计和技术的演进，相应的交互界面也有了长足的发展：从命令行操作界面（CLI）到图形用户界面（GUI），从单一的文字显示到图片、声音、视频等多媒体输出，从单纯的键盘输入到指点设备、触控屏和其他增强体验的输入外设。

目前，随着大数据和互联网技术的发展，智能环境的信息供给能力和用户的信息获取需求越来越高，人机交互进入了“以图形界面为基本，语音、手势、体感等外设为扩展”的交互形式。因此，除了以视觉为主的 GUI 界面，融合视觉、听觉、触觉等多通道趋势已经显现出来。

2.5.2　信息交互设计的多通道趋势

随着数字信息的质和量的提升，用户对数字信息获取和操控的带宽和速度有了更高的要求。除了对数字信息进行合理的信息设计，进行有效的传达以外，扩展信息交互的通道成为主要关键点。

多通道交互，即利用人的视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉等多个感官，发挥它们互补的特性，通过多种交互方式的协作，以自然的方式进行高效的人机交互。多通道界面的构想可以追溯到 20 世纪 60 年代。1967 年，MIT 教授 Nicholas Negroponte 创办了 Architecture Machine Group，并提出了“交谈式计算机（conversational computer）”的概念：用户可以用语音、手势、表情、注视和肢体语言与机器进行交互。① 20 世纪 70 年代末，MIT 教授 Richard R. Bolt 提出了 Media Room② 的多通道研究，在一间充满媒体资源的屋子里，用户通过手势、语音与屋内视觉屏幕呈现的信息交互。

与此同时，多通道研究在用户认知方面也有相关研究。Allport 等人③在 1972 年提出了多通道假设，并实验证明了人的不同感觉通道占用着不同

---

① 穆怡雯. 多通道交互设计方法研究[D]. 北京：北京邮电大学，2008.

② Bolt RA. “Put-That-There”：Voice and Gesture at the Graphics Interface[M]. California：Life Time Learning Press，1984.

③ Allport D A，Antonis B，Reynolds P. On the Division of Attention：A Disproof of the Single Channel Hypothesis[J]. The Quarterly Journal of Experimental Psychology，1972，24(2)：225-235.

的脑力资源。随后，Mayer 等人[①]提出了多通道、多媒体学习的认知理论，在视觉和听觉双通道下探索学习效率问题，并提出了信息学习和加工的系统模型。[②]

在多通道交互界面下，用户对于信息的认知和加工也呈现出不同通道间的联系和整合。图 2.10 为中国科学院针对多通道研究的融合触觉、听觉、视觉的多通道信息认知加工模型。三种感觉通道从信息呈现、感觉记忆到工作记忆，对信息进行深层次的理解，并在理解过程中进行跨通道的相互关联整合，辅以已有的经验知识进行最终的认知理解。

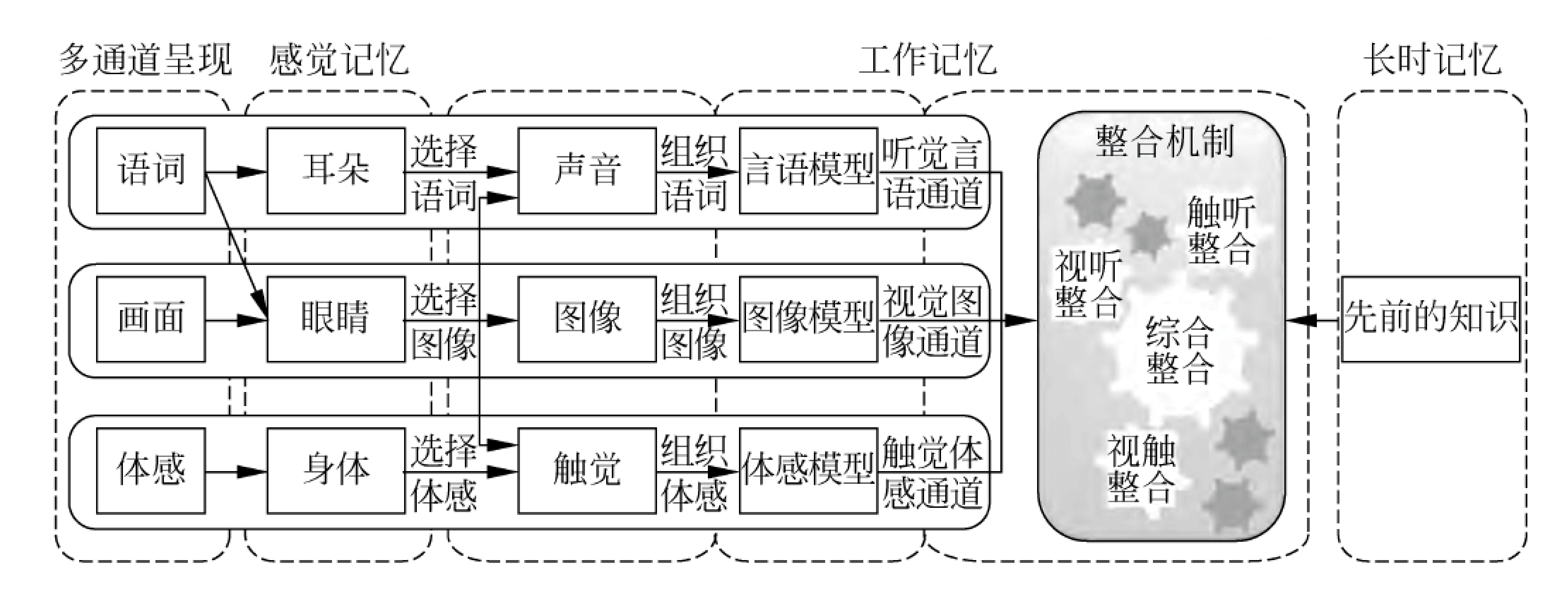


图 2.10　融合触觉、听觉、视觉的多通道信息认知加工模型[③]

除了针对用户的多通道认知理解外，我们还需研究智能计算机端的多通道信息输入输出模型。针对置身于物理世界中的操作用户和环境因素，智能计算机从网络数据库中提取数据，之后通过特定的应用程序选择匹配的交互控制方式，再通过图像、声音、触控、环境等方式承载输入输出信息，并通过适当的交互设备，如显示屏、触控屏、键盘、鼠标、体感设备、环境传感器等构成交互界面，最终与人和环境进行信息的传递。图 2.11 为多通道交互的分层处理模型。

在多通道交互中，一个核心问题是各通道间不同的信息是否会造成互

① Moreno R，Mayer RE. Cognitive Principles of Multimedia Learning：The Role of Modality and Contiguity[J]. Journal of Educational Psychology，1999，91(2)：358-368.

② Mayer RE，Moreno R. A Split Attention Effect in Multimedia Learning：Evidence for Dual Processing Systems in Working Memory[J]. Journal of Educational Psychology，1998，90(2)：312-320.

③ 路璐，田丰，戴国忠，王宏安. 融合触、听、视觉的多通道认知和交互模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2014，26(4)：654-661.

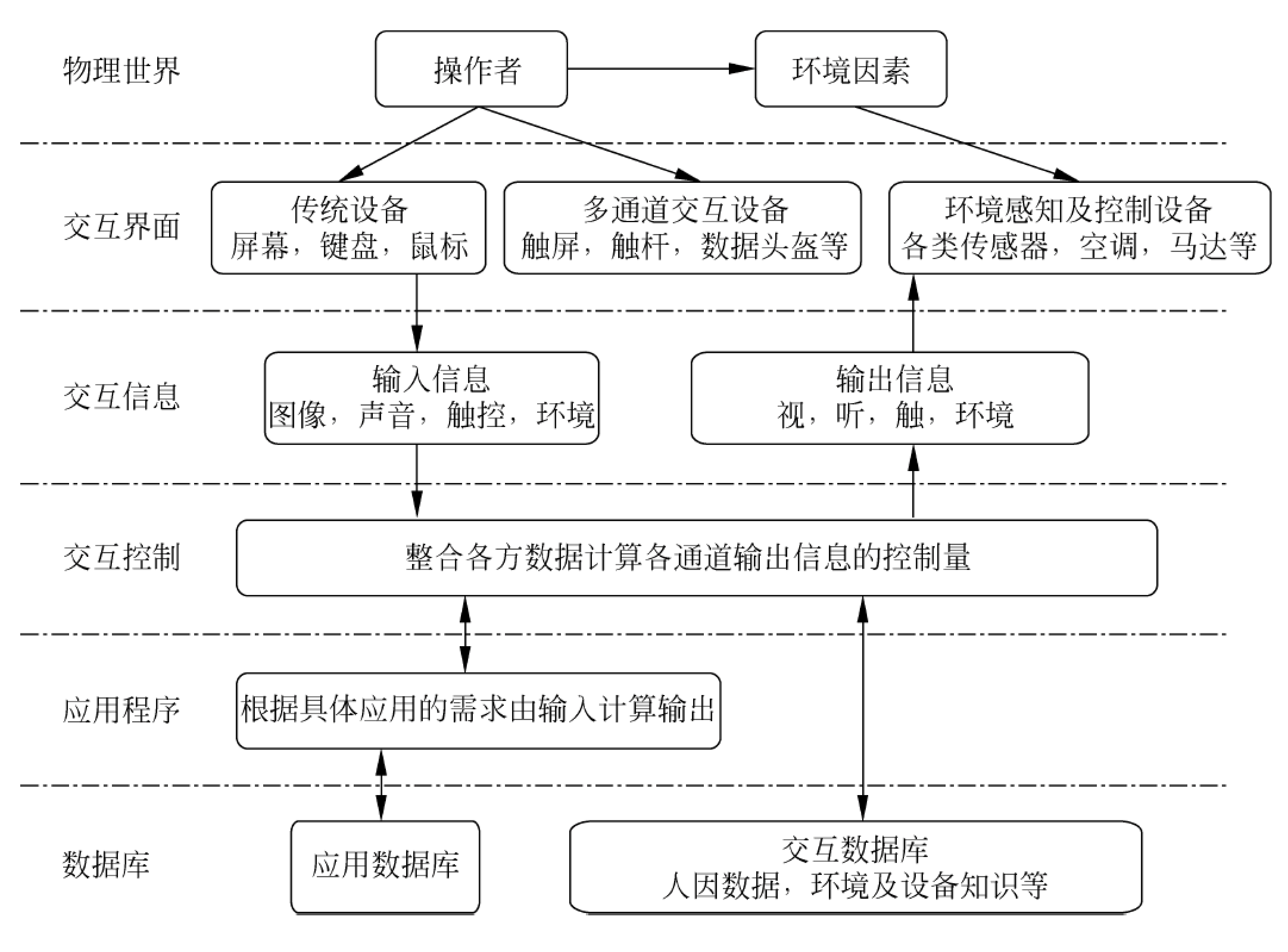


图 2.11　多通道交互的分层处理模型①

相的干扰。该类问题被定义为“跨通道一致性”(crossmodal congruency)。跨通道一致性的研究方式主要通过心理学和行为学的跨通道任务实验，且多为研究视觉与触觉的跨通道干扰问题。相关实验研究中，被试手拿两个方形小盒子。小盒子既可以震动引发触觉感知，也可以发光引起视觉注意。用户被要求在某一次实验中，以光纤/震动为标准，举起小盒子，而忽视同时产生的震动/光纤干扰。实验还引入了被试的双臂是否交叉握住盒子。实验证明，最显著的跨通道一致性效应(crossmodal congruency effect)出现在盒子的震动源和光源最近的时候，与双臂是否交叉无关。

此外，跨通道一致性实验还测量了实验者手部的相对位置变化、通过镜子使视觉通道镜像的变化、引入相似物体进行视觉干扰的变化、手部使用工具的变化等方式。大量的心理学和行为学实验表明，在完成触觉的震动感知并举起物体的任务时，视觉干扰的因素呈显著效果。当触觉振动源和视

① 路璐，田丰，戴国忠，王宏安．融合触、听、视觉的多通道认知和交互模型[J]．计算机辅助设计与图形学学报，2014，26(4)：654-661.

觉发光源同时响应，且两者的空间距离最近时，跨通道一致性效应最显著，当两者时空距离逐渐变大时，跨通道一致性效应开始下降。①

在多通道设计中，跨通道一致性问题是非常重要的。设计者需考虑如何使各通道的信息互补结合，在用户认知上促进多感官信息整合，同时避免由于人的认知和注意力特点而产生的跨通道一致性效应。

2.5.3 实体用户界面 TUI 的触觉需求

考虑到多通道交互的优势和需求，设计师需据此重新设计多通道下的交互界面。回顾整个交互历史，人与计算机的交互界面从命令行到图形操作，再发展到智能手机的触控操作。从人必须适应计算机运行而进行的交互，发展到计算机及信息界面开始适应人的认知和操作。然而，用户在物理世界中积累的知识和经验如何方便地“迁移”到数字世界中，以及如何最大化地消除虚拟的数字空间和物理空间的壁垒，是数字世界界面设计的重要问题。

在此背景下，实体用户界面(tangible user interaction，TUI)的构想孕育而生。1997 年，MIT 媒体实验室教授 Hiroshi Ishii 发表论文 *Tangible Bits：Towards Seamless Interfaces between People，Bites and Atoms*②，标志着 TUI 的概念被提出。Hiroshi 用“可触摸的比特”在真实世界中使可抓握的物体和任意的数字媒体相结合，从而构建了连接数字比特世界和物理原子世界的桥梁。TUI 将用户从计算机屏幕前解放出来，变成与整个物理环境交互。

TUI 实体用户界面的构想依赖于用户在物理世界的日常工作生活中的经验技能与心理情感体悟，保留了用户在真实物理世界的使用心理与使用习惯，降低了用户在非数字世界与数字世界两者之间的感知、认知与情绪方面的迁移成本。

随着数字网络和交互技术的快速发展，尤其是“互联网＋”和物联网的

---

① Ming Lin，Miguel Otaduy. Haptic Rendering Foundations，Algorithms，and Applications [M]. Wellesley：A K Peters/CRC Press，2008：21-50.

② Hiroshi I，Brygg U. Tangible Bits：Towards Seamless Interfaces between People，Bits and Atoms[C]//Proceedings of the ACM CHI 97 Human Factors in Computing Systems Conference，Atlanta，Georgia，1997：234-241.

兴起，越来越多的学者和业界进行了 TUI 的理论和实践研究。[①] 如 MIT 媒体实验室在 2013 年的 inFORM 项目，通过 900 个可升降的方形棒，组合成一幅 30×30 可动态变换高度的幅面，并在该幅面上探讨了物理上动态的示能性（dynamic affordances）和限制性（constrains）。这些示能性和限制性的操作都依托于动态的物理幅面。在交互过程中，对物体，以及对幅面的点、线、面的操作都通过触觉控制完成。与此同时，幅面上方的投影将匹配的视觉信息投射到幅面上，实现了触觉和视觉的信息统一。

除此之外，MIT 媒体实验室在 2015 年的 LineFORM 项目也是一个 TUI 的应用尝试。该原型用多个伺服电机串联安装，即电机机身与相邻电机的旋转运动处黏合，并在外层包裹弹性纤维材料。原型通过有线连接至电脑控制端，使如一条线一样的设备在任一伺服电机关节处都可做弯折。依托于此，LineFORM 可以呈现自身驱动的动态曲线交互界面，如物理形状的显示、物理交互和变形、物理限制等。

国内的研究机构也针对 TUI 进行了交互界面的设计和尝试，如清华大学美术学院 X 工作室的 LIME 项目。[②] 针对液态金属根据不同电场环境下的可变形特性，LIME 将液态金属引入了实体交互，使之在外界电场环境中和人的触觉操作中改变形态和移动，从而实现数字语义的物理呈现，见图 2.12。

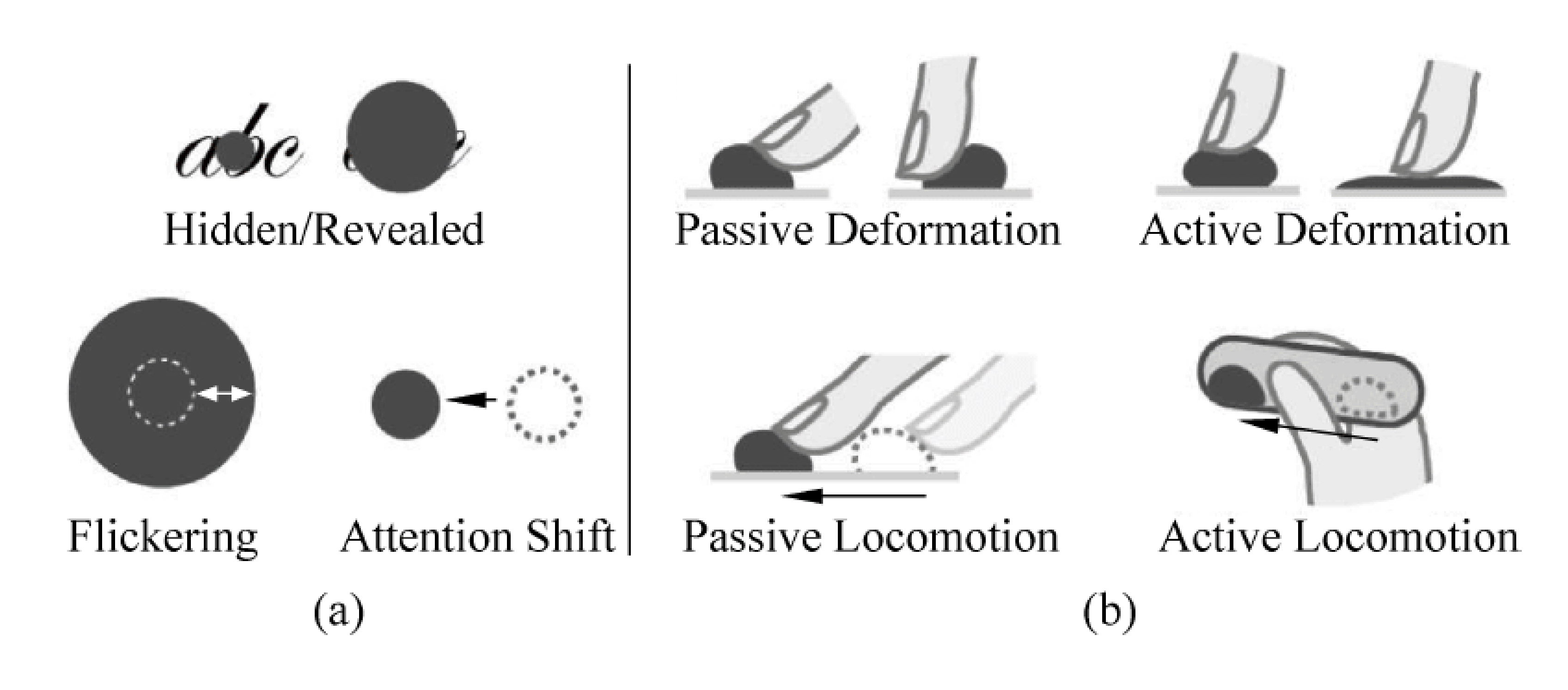


图 2.12　LIME[③]

① Shaer，Eva Hornecker. Tangible User Interfaces：Past，Present and Future Directions[J]. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction，2009，3：1-137.

②③ Qiuyu Lu，Chengpeng Mao，et al. LIME：LIquid MEtal Interfaces for Non-Rigid Interaction[C]//Proceedings of UIST 2016，ACM(2016).

在以上 TUI 实体用户界面的研究案例中，触觉的操作和反馈成为交互的主要形式。当数字虚拟空间中的信息通过实体用户界面凝结于实体中时，用户可以将物理世界的经验知识无缝迁移过来。在用户心理层面上，实体可以呈现稳定、实在的感觉，而触觉可以将这种“看得见、摸得着”的安全感带给用户。

物联网和传感器网络系统的技术发展，使普适计算和无间断交互在特定环境中成为可能。用户一旦产生获取信息的需求，就不必要操作电脑、移动手机等屏幕显示设备，而会采用更自然的信息输出方式，比如语音、手势等。然后，普适计算环境可以通过实体界面承载信息，输出信息。整个输入输出的信息交互都在物理时空中运行，使用户感受不到虚拟的数字时空。这种基于实体的交互体验主要建立在用户对实体的触觉知识和触觉感受。以触觉为基本，并在视觉和听觉上完整地呈现信息，方能实现实体用户界面的良好体验。

2.6 触觉交互设计的研究路径

本研究从人本主义视角出发，致力于探索在人机交互设计中，触觉通道所发挥的作用，包括针对特定用户及其触觉认知研究、触觉交互体验的分析以及触觉交互设计方法论研究。首先以用户为中心，以用户的视角讨论触觉交互需求和触觉认知，然后以用户体验的角度，强调整个“人-事-境”过程中的交互体验设计。最后，根据用户研究和交互体验设计，推导针对特定用户的触觉交互设计原则与方法，并据此完成设计实践，印证方法。

2.6.1 用户群体

用户研究是任何好的设计的关键，也是设计研究不可或缺的重要部分。本书针对的特定用户群体是盲人用户，讨论盲人的触觉认知及交互体验设计。研究会引入基本的用户研究方法，如用户访谈、焦点小组、可用性测试、用户参与设计等。然后建立针对该群体的人物角色模型，使多个个性设计需求上升为共性。

另外，人触觉的心理物理学性质指导了触觉交互设计。而针对盲人群体，他们的触觉感觉与一般人相比是否有差异，在他们脑中建立的物理世界的概念是怎样的，这些问题都需要通过详尽的用户研究来解答。因此第 3 章围绕盲人用户的习惯、经验和触觉认知进行研究。

2.6.2　触觉体验

“体验”是交互设计中的重要一环。以产品视角看，Jesse Garrett 提出“体验是指产品如何与外界发生联系并发挥作用”。以用户视角看，“体验是指人通过与外界事物的交往，在真切感受和深刻理解的基础上，产生情感并生成意义的一种心理活动。它不仅指一种内心形成物，更强调的是一种声明历程、过程和行为”[①]。

相对于触觉辅助设备或触觉产品设计，触觉用户体验设计通常要解决的是产品使用前、使用中、使用后的整个过程的综合问题。以体验为设计根本，才是未来交互设计的方向。第 4 章将针对盲人的触觉体验，研究触觉体验的特点、本质和影响因素。

2.6.3　交互范式

根据用户触觉心理物理学研究和触觉体验研究，本书试图探索盲人以触觉通道为主的交互体验设计方法，从而让用户获得更好的情感满足，并采用更好的“实在”的实体交互设计策略，将设计导向、设计原则、设计要素、设计方法上升为范式，力图为面向盲人群体的信息设计提供可靠的设计理论与方法。

2.7　本章小结

本章以触觉为主要研究对象，通过触觉的生理解析、心理解析和情感解析，建立了触觉研究的理论框架。然后从信息设计的角度，阐述了信息交互设计中触觉通道所占的重要作用以及目前触觉交互的现状。实体交互界面和多通道交互是未来发展的重要方向，而触觉在其中占有突出的作用。最后以用户群体、触觉体验和交互范式为三个方向，为触觉交互设计提供了下一步的研究路径和方向。

① 张烈. 以虚拟体验为导向的信息设计方法研究[D]. 北京：清华大学，2008.

第 3 章　盲人的触觉认知与交互设计

“我的手在罗马以及晚期那些栩栩如生的大理石雕塑上停留过，在米开朗基罗那激动人心的英雄摩西石膏像上抚摸过，我了解罗丹的才能，对哥特人木刻的虔诚精神感到敬畏。我能理解这些用手触摸过的艺术品的意义，然而那些只能看不能摸的东西，我只能猜测那一直躲避着我的美。我能欣赏希腊花瓶简朴的线条，然而对它那带有图案的装饰我却毫无所识。”

——海伦·凯勒《假如给我三天光明》①

由于视觉能力的缺失，盲人在日常的生活、教育和工作中主要依靠听觉、触觉、嗅觉、味觉等感觉通道，其中触觉和听觉的使用最为广泛。在信息时代，针对数字信息的获取，盲人也主要使用触觉和听觉。听觉方面，多使用个人电脑或智能手机的语音辅助应用（Microsoft Accessibility，VoiceOver，Talkback）；触觉方面，可使用用于文字阅读的盲文点显器。

第 2 章已经进行了人体的触觉系统、触觉交互设计的梳理。如果针对特定用户，即盲人用户做设计，针对盲人的触觉交互设计又有什么特殊性？盲人的触觉辅助设备的历史和演变过程是什么样的？盲人通过触觉的认知能力有几何？本章试图解答这些问题。

本章先进行盲人用户的整体背景研究，探讨针对盲人的触觉交互的可用性。然后从交互设计的角度，对盲人的触觉辅助设备做系统的梳理和案例分析，并以盲人用户的触觉体验为准则进行分析。最后，根据以上触觉辅助设备，辅以触觉的心理物理学结论和准则，通过触摸图形尺寸、触摸方式、触听觉多通道和触摸引导四个维度的实验，剖析盲人触觉的认知能力和机理，给出盲人触觉交互设计导向。

---

① 凯勒 H. 假如给我三天光明[M]. 李汉昭，译. 北京：华文出版社，2002.

3.1 盲人用户研究及触觉交互可用性

3.1.1 盲人群体数量统计

据世界卫生组织 2017 年数据[①]，全球视力受损人数为 2.53 亿，其中 3600 万为全盲患者。表 3.1 为世界卫生组织 2012 年公布的世界范围视力受损人群数量信息：

表 3.1 世界范围视力受损人群数量信息[②]

年龄(岁)	人口数量	盲人数量	低视力者数量	视觉受损者数量
0～14	18.4850 亿	142.1 万	1751.8 万	1893.9 万
15～49	35.4820 亿	578.4 万	7446.3 万	8024.8 万
≥50	13.408 亿	3216 万	1.5404 亿	1.8620 亿
所有人	67.375 亿	3936 万	2.460 亿	2.8539 亿

而作为世界上人口最多的国家，中国的视力受损情况很不乐观。WHO 2014 年的数据显示，中国每百万人口中包括 5.54 万视力受损人口，相比其他地区盲人占比更高。如按照中国总人口 14 亿计算，视力受损人口估算为 7756 万，包括 854 万全盲患者，相关数据见图 3.1。

相对地，根据中华人民共和国残疾人联合会的官方公告，截至 2010 年，我国残疾人总人数为 8502 万，其中视力残疾 1263 万人。[③] 根据 2016 年中国盲人协会会议通告，截至 2016 年，我国视力残疾者约为 1600 万人。国内与国际的统计人数有较大差别，其原因在于视力残疾的定义标准，以及统计方式的差别。我国的残疾人服务，尤其是视力残疾的无障碍事业，还有较大提升空间。

3.1.2 信息时代下的盲人群体

英国著名作家狄更斯曾写道：“这是最好的时代，这是最坏的时代。”在

① World Health Organization. Blindness and Vision Impairment[OL]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment.

② World Health Organization. Global Data on Visual Impairments 2010[M]. 2012.

③ 2010 年末全国残疾人总数及各类、不同残疾等级人数. 中国残疾人联合会[OL]. http://www.cdpf.org.cn/sjzx/cjrgk/201206/t20120626_387581.shtml.

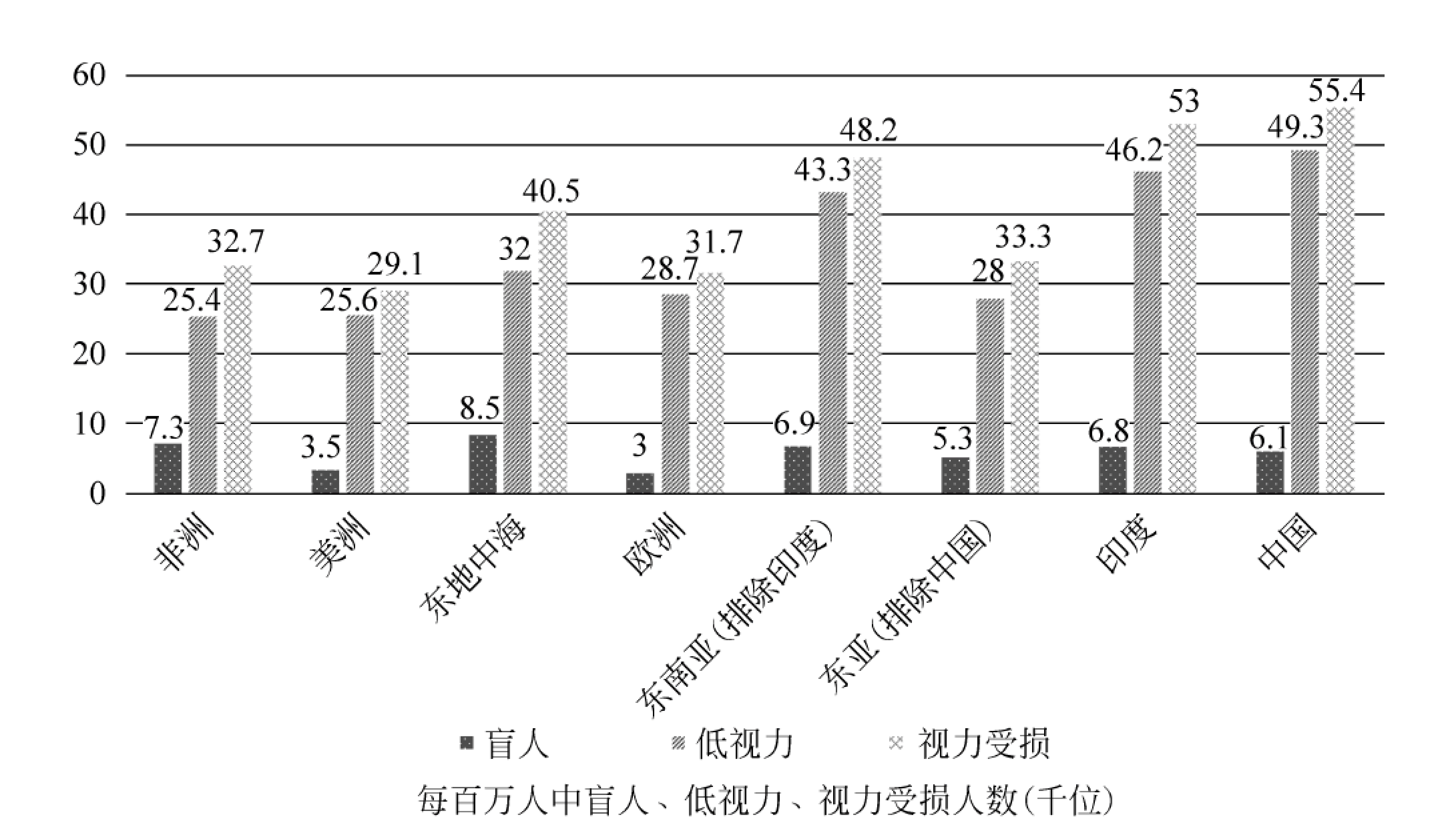


图 3.1 各地区盲人数量及占比[①]

当今信息时代，大数据和移动互联网飞速发展，影响着大众用户使用数码产品的习惯和信息的交互方式。而对于盲人群体而言，信息时代的发展就像一把双刃剑，显著地影响着盲人的生活。这里有一个笔者亲身经历的故事：

“因为此研究课题，我会去盲人学校与盲生近距离接触。有一次我跟他们在一起的时候，一个盲人同学让我帮他个忙，原来他在用电脑访问 12306 网站买火车票，却卡在了最后一步：识别图片验证码。”当时的情况如图 3.2 所示。

“因为盲人无法靠自己识别这些图像，我作为明眼人帮他勾选，这才成功提交。在这件事之后，我才越来越多地注意到，我们的网络世界中到处都有类似图片验证码的设计，比如各种各样的登录页面和操作界面，如图 3.3 所示，后来在跟盲人朋友的交流中，他们也说这是个非常困扰他们的问题。”

这件事的起因只是一件小事，却带来了笔者对信息时代、信息科技的反思。正如前文所说，盲人群体正在被“双刃剑”的信息科技左右着。对此，该问题可细化为：大数据、移动互联网的时代背景对盲人的生活、体验等方面有何影响？盲人用户对此有何期望和愿景？（问题 1）

① World Health Organization. Global Data on Visual Impairments 2010[M]. 2012.



图 3.2　中国官方火车票网络销售页面①



图 3.3　各种操作界面的图片验证码

3.1.3　信息时代下盲人认知与交互现状调查

针对上节提出的问题，信息时代对盲人的影响可以是积极的、中立的或消极的。那其中的变化和影响，与盲人触觉的介入产生了多少相关性？换

① 铁路客户服务中心[OL]. www.12306.cn.

言之，盲人用户在多大程度上运用触觉进行认知与交互，以适应现今的大数据和移动互联网的信息时代？（问题 2）

问题 1 和问题 2 互有侧重，又存在递进关系。因此，笔者采用人类学方法，通过体验盲人生活和深度访谈的研究方法，进行定性分析。

访谈 3.1：用户访谈，近五年乃至近十年（2006 年到 2011 年再到 2016 年）互联网、移动智能手机等信息技术和设备的发展，对盲人用户学习、工作和生活等各方面的影响；盲人用户是否利用触觉认知及交互的方法应对这些变化和影响？

访谈提纲：

- 五年前（2011 年）/十年前（2006 年）在生活中使用哪些工具来获取信息？在学校中通过哪些方式学习？工作的环境是怎样的？
- 现今（2016 年）在生活、学习和工作中又是怎样的？
- 觉得科技的发展和变化有没有切实帮助到盲人？
- 是否利用触觉的相关方法应对这些变化和影响？
- 随着时代发展，触觉在日常生活中用来获取信息所占的比重有怎样的变化？
- 有没有利用触觉的相关方法来帮助生活、学习和工作的需求？

访谈对象：四位全盲患者，三位盲人是北京一所高校的在校大学生，第四位来自一家社会助盲机构。具体信息见表 3.2。

表 3.2 实验 3.1 访谈对象信息

序号	名称	年龄	性别	是否全盲	致盲时间
1	Guang	30	男	是	23 年
2	Di	24	男	是	22 年
3	Chenlin	25	男	是	10 年
4	Yongzhou	43	女	是	35 年

访谈概要：

用户 1：“盲人一直是社会上的弱势群体，没有过多的选择，只能不断学习和跟随社会的主流通信方式和学习方式。近五年来变化最快的是手机和移动互联网，从以打电话为主的沟通方式变成混合了即时通信和社交分享应用（如微信）的方式。它确实给我们的生活带来了便利，或者说，即时通信和社交分享应用在一些时候抹平了盲人和正常人的鸿沟，而在这其中，触觉的利用非常有限，主要用于平时生活所处的具体场景的辨认识别，在近五年

内基本没有什么变化。目前遇到的问题是网页上、微信上遇到图片内容时无法获取,比如好友发的微信朋友圈照片读不懂,以及网页上的图像验证码问题,也是一直没有解决的。”

用户 2:“我在五年前改用苹果手机,现在已经是第二个苹果手机了。它的 VoiceOver 功能非常好用,盲人也能像正常人一样使用很多 App 应用。但是在应用里关于图片的信息始终无法获取,比较可惜。触觉方面,因为我在做文字校对的工作,平时会遇到盲文点显器。近几年的变化是点显器的配备和使用逐渐增多,以及北京盲文出版社的触摸博物馆展品越来越多。盲人可以摸到很多珍贵的展品。”

用户 3:“我觉得近五年的科技发展没有给我带来太多变化,我也不太关心。我还在用 2010 年买的诺基亚手机,平时打电话发短信足够了,有的朋友在用智能手机玩微信,我觉得兴趣不大。我主要通过电脑上网看新闻,争渡语音软件基本够用了,就是有些图像格式读不了。触觉主要帮助我日常活动、行走,跟互联网的发展关系不大。”

用户 4:“我喜欢读书,这几年关于大数据、互联网的发展一直都有所了解。我也在网上了解到很多用于帮助盲人的设计和产品的尝试,这都是好的趋势。不过这些设计和尝试还没有普及到我们的身边。就目前而言,感受最直接的就是智能手机和应用的发展。我用的是小米手机,它的语音辅助很好用。我主要用社交类、地图类和消费点评类应用,用语音辅助就可以完成大部分任务,只是图像信息没有太多办法。平时我会用盲文点显器工作,这几年点显器也有更新换代,触摸的感觉变得更好了,与计算机的兼容也会更好。”

访谈整理及分析:

在接受访谈的四位盲人中,盲人用户都或多或少地关注目前科技的发展。用户 3 的关注度较少,另外三位盲人关注较多。在智能手机的使用上,除用户 3 外其他三个人都在使用,使用频率较高的是通信社交分享类应用,比如微信。在他们的日常生活中,语音辅助起到了非常重要的作用,无论是移动手机端还是电脑端,包括手机或电脑的操控导航、页面文字信息的获取等。同时语音辅助的短处也被四位用户同时提起,即对图形图像信息没有办法获取。

在触觉的使用上,盲人群体以日常活动和生活为主。触觉用于信息获取和交互的场景主要有盲文点显器的使用,以及在触觉博物馆中触摸实体模型。用户 2 和用户 4 工作中会经常用到点显器,近五年的发展仅停留在

点显器的触摸体验和软件的可用性上，对于交互方式并无实际应用的变化。

因此，通过访谈整理，从设计角度分析，盲人用户已经形成利用听觉通道进行信息获取的习惯。尤其智能手机、个人电脑的普及推动着盲人更多地用语音辅助功能浏览网页，获取文字信息。而触觉相关的交互方式则发展较慢，还停留在以文字阅读和电脑控制为主的信息输入输出上。

以上访谈及实际市场应用的分析印证了触觉交互的研究现状。在多通道的实际应用场景中，触觉交互的作用还有待提高。对此，本章试图通过盲人触觉辅助设备及其交互的梳理，以及盲人触觉认知能力的深度剖析，以盲人用户为中心，探讨盲人的触觉交互设计。

3.2　盲人触觉辅助设备及其交互

目前，盲文点显器是盲人用户比较常用的触觉辅助设备。自 20 世纪 50 年代计算机被发明以后，人们便在思考如何将计算机技术以盲人的触觉通道应用到他们的认知、学习与生活中。通过分析触觉辅助设备的历史发展和演变，可以得出触觉辅助设备的交互方式及设计思考，进而指导触觉认知与交互设计。

3.2.1　盲文及实物模型

在计算机及数字信息之前，触觉的认知、学习和对实体的交互便已存在。在盲文问世之前，盲人的语言教育问题一直没有解决。最早期的尝试方式是将纸上的文字形式（如笔画、字母、音节等）以凸起一定高度的方式呈现，盲人对二维平面的文字图形进行记忆和认知。但这种方式使得印刷出来的图书非常笨重，触摸速度很慢，且文字书写更为困难。直到 19 世纪路易斯·布莱尔发明了 6 点盲文（Braille），才彻底颠覆了盲人用户阅读文字信息的方式和体验。[①]

布莱尔盲文以 6 点的点方为基础，每个点有高低两种状态，因此每个点方有 63 种变化，如图 3.4、图 3.5 所示。布莱尔将每个点方与字母按一定规则匹配，建立了一套符合大众的以凸点和点方为基本元素的文字体系。针对不同地域的不同语言和文字，只需将点方与当地语言文字的基础形式重新对应，盲文点字就可以适配。此后，布莱尔盲文大获成功，并广泛应用于全球各地。

① 滕伟民，李伟洪. 中国盲文[M]. 2 版. 北京：华夏出版社，2014：1-5.

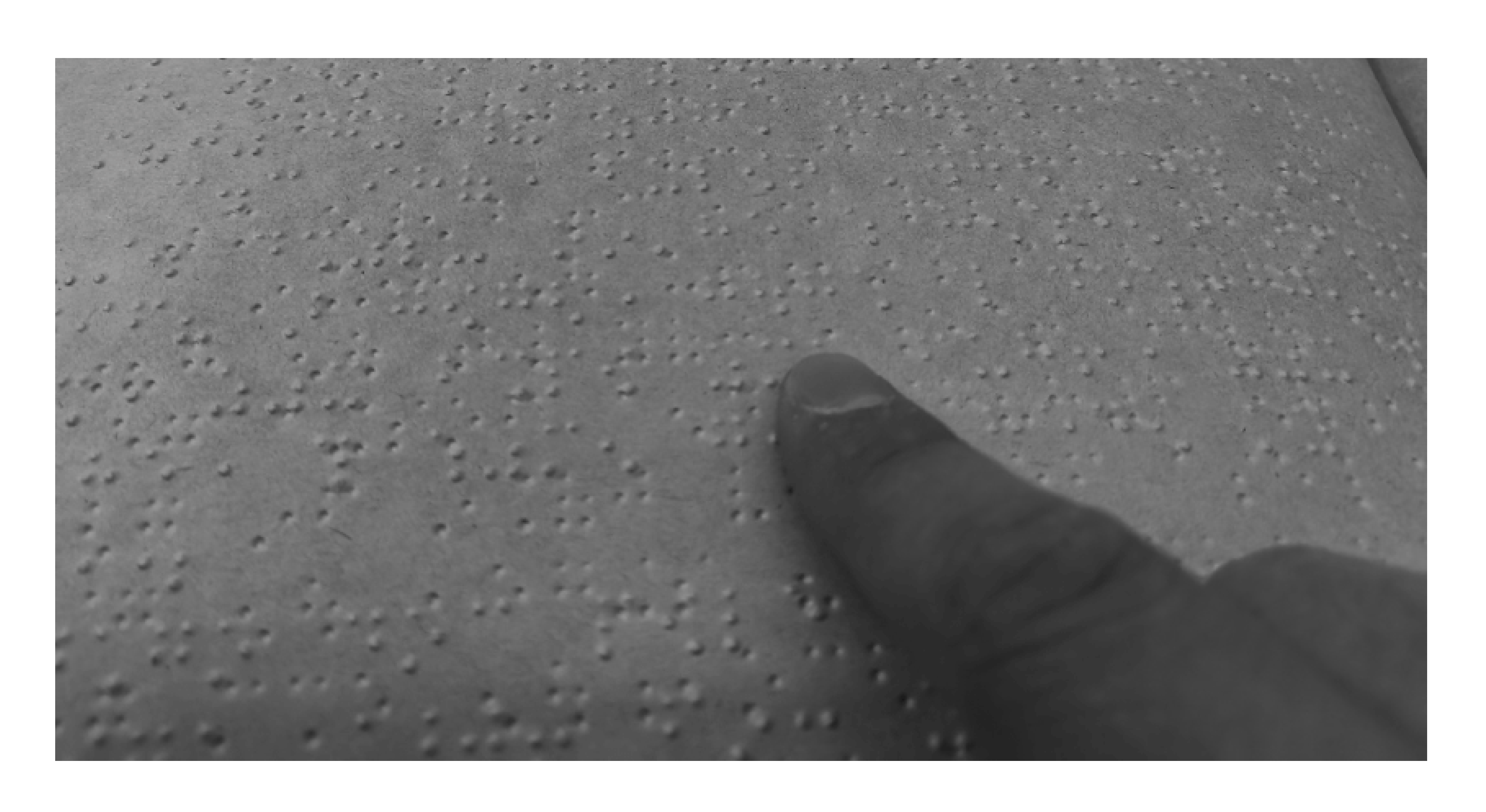


图 3.4 Braille 布莱尔盲文

中国汉语盲文符号

一、字 母

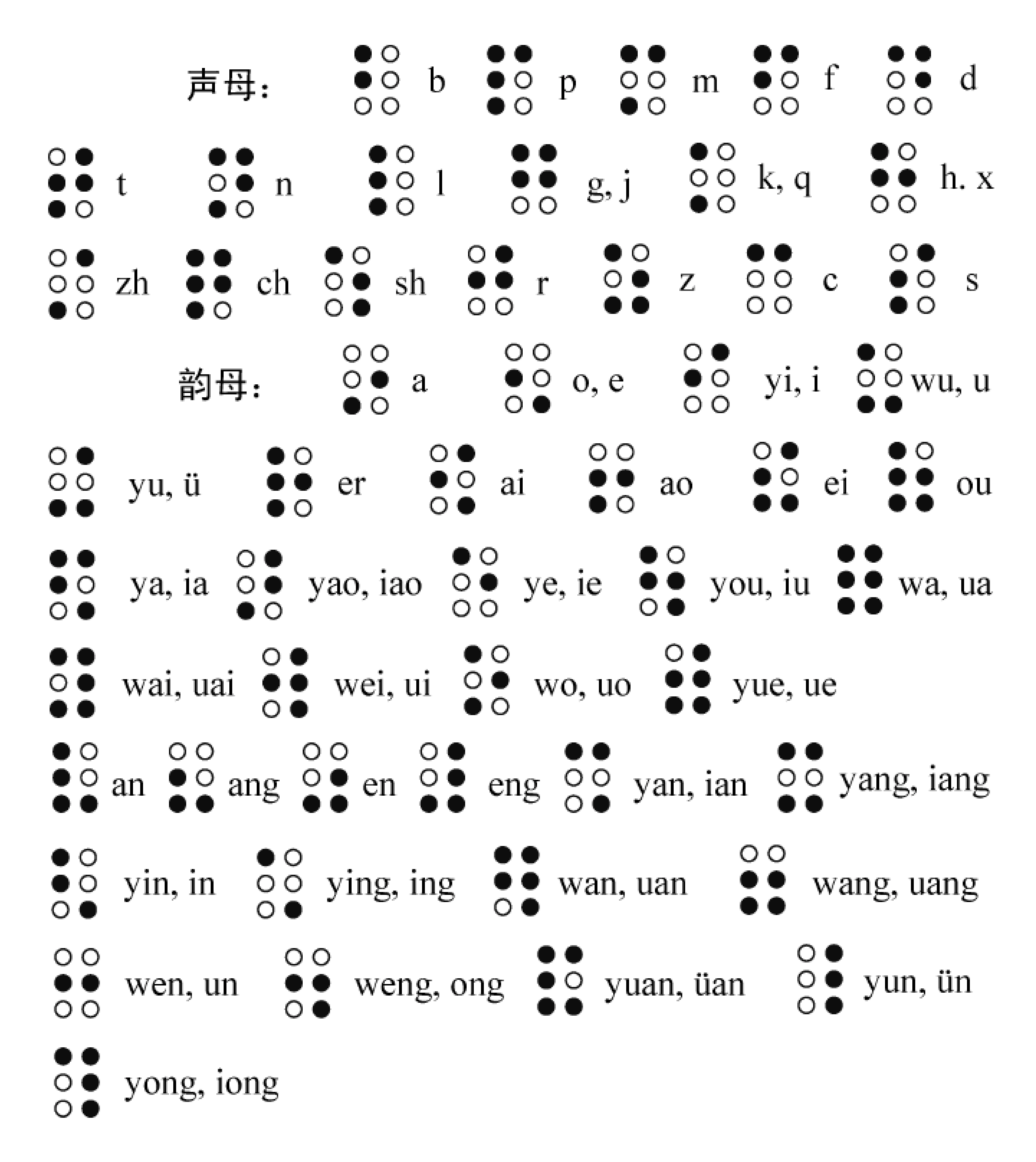


图 3.5 中国盲文字母表①

① 滕伟民，李伟洪. 中国盲文[M]. 2 版. 北京：华夏出版社，2014.

布莱尔盲文的设计安排有三个特点：第一，字母符号之间在点位上互有联系，有助于记忆；第二，用一个符号表示一个常用的词或字母组合，显示了文字的符号性的本质，音素化是一种手段；第三，其中的标点符号、各种指示符号以及缩写符号都是属于表意的文字符号。

布莱尔盲文的案例带给触觉交互及其设计很多启示和借鉴。纵观世界范围常用的语言文字，它们的形态设计主要考虑视觉的识别和书写，并不利于直接的触觉凸起和渲染。而布莱尔盲文的设计考虑了人的触觉特点和心理物理学，以凸点及其组合作为基本语素。虽然需要建立语言文字与盲文的映射，但盲文的读和写能极大地方便盲人用户，所以得到广泛的推广和传承。直到现今，盲文依然是广大盲人用户学习和使用的得力工具，也是盲人通过触摸学习和认知其他信息的基础。[①]

实物模型同样具有极大意义。盲人通过实体的直接触摸来快速学习和认知。对于较难接触到的物体或抽象语义的信息，利用实体模型触摸学习是非常便捷高效的学习手段。然而模型的生产制造成本较高，且大量的模型不易存放，所以目前实物模型主要用于学校中数量有限的教具，以及在触摸博物馆供盲人学习。比如福建省博物馆曾举办过触摸感知展览“触·觉——法国卢浮宫触摸雕塑艺术特展”，供盲人用户触摸参观和学习。[②]

3.2.2　“TVSS”触视觉替代系统

20 世纪中叶，随着第一台计算机的发明和第三次科技革命的兴起，人们开始思考如何将计算机和数字技术应用到盲人群体。美国神经系统科学家 Paul Bach-y-Rita 在神经可塑性和感官替代领域取得突破性进展，于 1968 年开发了“Tactile Vision Substitution System”（触视觉替代系统），并将成果发表于 1969 年的 *Nature* 杂志上，引起了强烈反响。[③] 图 3.6 为 TVSS 原型。

触视觉替代系统致力于探究视觉信息被其他感官代偿的方式及其可用性。在该系统中，视觉信息被转化为触觉信息。如图 3.6，一个大型摄像装置被用于捕捉前方物体的轮廓。系统将物体的轮廓等视觉信息映射到二维

---

① 程黎，顾定倩，等. 我国盲文使用状况的调查研究[J]. 语言文字应用，2013.5(2)：42-48.

② 福州：卢浮宫触摸雕塑艺术特展 盲人可感受维纳斯的美[OL]. http://news.sina.com.cn/c/2009.11.21/061016644295s.shtml.

③ Paul Bach-y-Rita，Carter Collins，Frank Saunders，et al. Vision Substitution by Tactile Image Projection[J]. Nature，1969(221)：963-964.

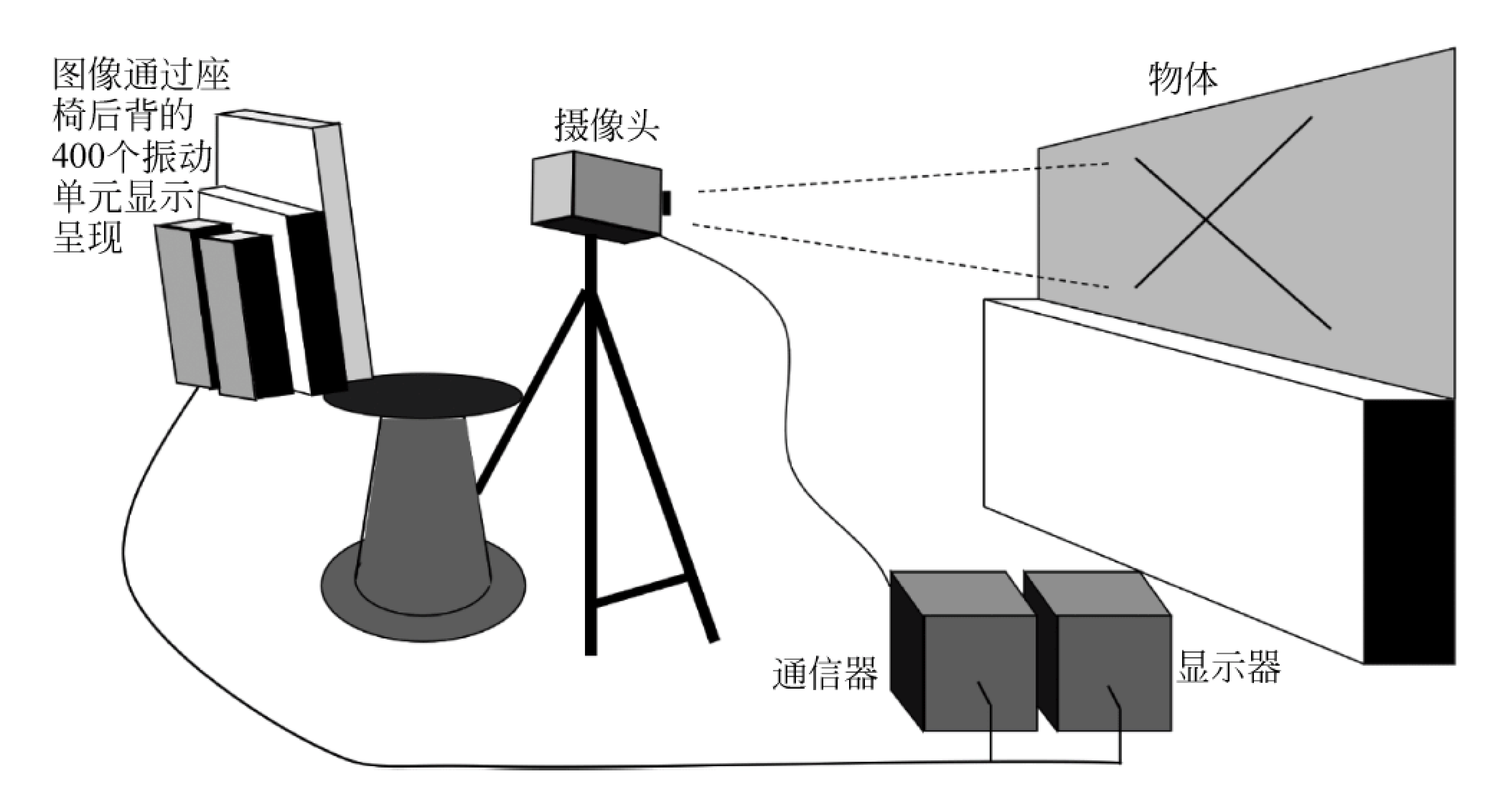


图 3.6 触视觉替代系统①

平面上，再通过触觉方式将图形渲染出来。图中右侧的口腔治疗座椅后背有四片触觉渲染装置，每片拥有 10×10 共 100 个触点。触点直径 1mm，点间距 12mm，因此整个座椅靠背共有 400 个触点。每个触点有高低两种状态。通过触点矩阵的高低排布，用户可以在背部感觉到触觉轮廓信息，从而以触觉方式进行视觉认知。

针对该系统，六位盲人进行了长时间的训练学习（Collins 学习了 150 小时，其他用户学习了 20～40 小时）。之后六位盲人与六位通过观看监视器图像的明眼人进行对比评价实验。实验数据表明，盲人与明眼人两组用户在方向和平行线识别实验中表现没有差别，在棋盘倾斜角实验中明眼人表现更好，尤其是反应时显著短于盲人。

触视觉替代系统在触觉设计和交互上有重大意义。第一，它是第一个利用计算机系统进行多感官间替代的尝试，开创了多感官代偿的设计和应用空间。由于视觉是感官通道中相对最常用的，围绕着视觉为中心的感官代偿得到了更多的关注。第二，本设备使用触觉进行代偿，在设计上该系统利用了人后背的一片区域，优点是能通过触觉快速感知点阵的整体信息，感知面积大，但同时产生的问题是细节的分辨率比较有限，从上述实验中可以印证，针对较复杂物体的识别表现与正常人有明显差距。第三，在交互上，

① Paul Bach-y-Rita, Carter Collins, Frank Saunders, et al. Vision Substitution by Tactile Image Projection[J]. Nature, 1969(221): 963-964.

该系统实现了外界视觉信息通过感官代偿，以触觉形式输出，并使用户通过触觉感知和理解。它实现了信息的输入单向流向。但用户无法方便地操作计算机摄像头识别范围，故而基本无法独立使用。

3.2.3　"Optacon"视触觉转换器

在面向盲人的触觉辅助设备历史上，Optacon 视触觉转换器占据着非常重要的历史地位。[①] 1969 年美国斯坦福大学电子工程系教授 John Linvill 研发了 Optacon 原型[②]，并于 1971 年通过 Telesensory System 公司进行正式的商用市场化。Optacon 产品造福了千万盲人用户。一直到 1996 年，Telesensory System 公司才停止生产 Optacon，到了 21 世纪，这一负有盛名的辅助设备逐渐远离了广大盲人用户。Optacon 商业上的成功说明其优秀的触觉交互设计和盲人用户体验，在设计上非常值得学习和借鉴。图 3.7 为 Optacon 设备和使用场景。

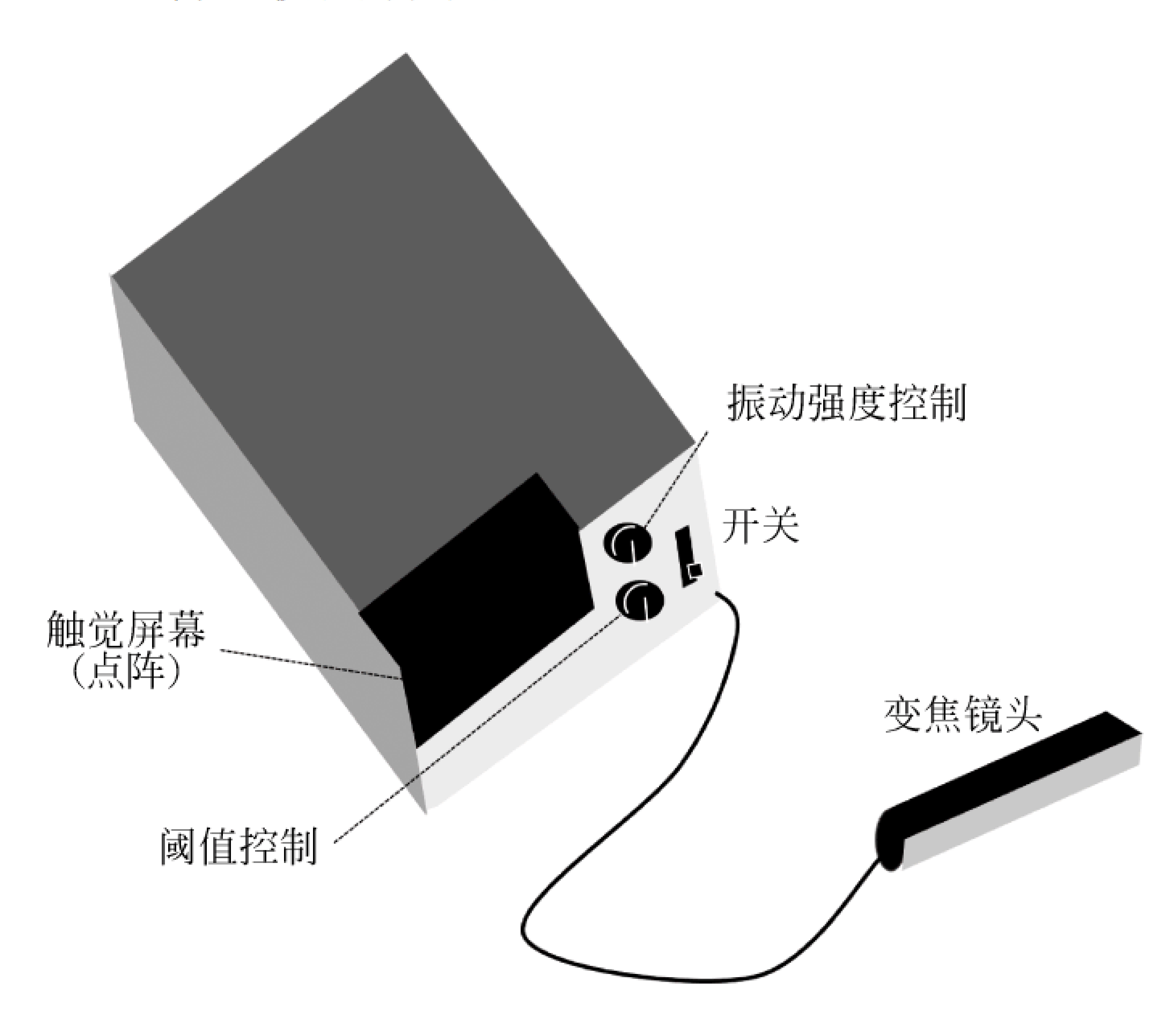


图 3.7　Optacon 设备

在当时，Braille 盲文虽然被广泛使用，但盲文图书的数量和内容始终不能满足用户的需求。盲人对正常印刷的图书有强烈的阅读需求。

① James Bliss，Michael Katcher，Charles Rogers，et al. Optical-to-Tactile Image Conversation for The Blind[J]. IEEE Transactions on Man-Machine System，1970：58-65.

② Linvill JG，Bliss JC. A Direct Translation Reading Aid for the Blind[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press. 1966，54(1)：40-51.

Optacon 的功能是将正常图书的视觉文字转化为触觉点阵呈现的触觉信息。如图 3.7 所示,用户右手持 Optacon 的摄像头传感器端,设备摄像头捕捉书中印刷文字的轮廓,将轮廓的图形信息通过用户左手触摸的点阵渲染出来。

Optacon 的设计受到了 optophone 的启发。20 世纪上半叶,伯明翰大学 Albe 博士发明了 optophone,通过扫描文本文字,然后以时变、不同音高的声音及和声辨别文本的字母。只是通过这种方式,文本阅读速度非常慢。于是 John Linvill 将听觉信息输出重新设计和开发,变为触觉输出。并且通过多次触觉实验,将触觉点阵设计为 24×6 共 144 个触点,触点列间距 1mm,行间距 2mm。触点的刷新频率可达 300Hz。

Optacon 的交互设计在当时是非常优秀的。从交互设计角度分析,该设备调动了触觉感官通道的一个重要特性:触觉输入和触觉输出的同时性。用户右手通过手部运动触觉进行文字扫描和控制,左手即可得到文字实时的触觉渲染。

从使用体验来说,Optacon 对于今天的盲人触觉认知研究程度,是存在问题的。主要因为盲人需要学习和掌握明眼人学习的字母的轮廓,这与布莱尔的 6 点盲文大相径庭。历史证明布莱尔 6 点盲文更适合盲人触摸的认知理解。而且,即使用户经过训练后,Optacon 的阅读速度也仅为 50 字/分钟,慢于标准布莱尔盲文的 100 字/分钟。

作为总结,Optacon 为盲人用户打开了普通文字图书的窗户,它适用于任何书籍,包括文字信息和插图信息,不受盲文图书资源的限制,具有更广泛的适用性,依然在盲人触觉辅助设备中占据着非常重要的历史地位。

3.2.4 电脑外设触觉辅助设备

随着信息技术的发展,个人电脑逐渐普及,更多的数字信息走入了人们的视线。围绕着盲人群体如何使用电脑和获取数字信息,研究机构和产业界一直在做出不断的尝试。进入 21 世纪后,随着多媒体技术的成熟,文字转语音(TTS)技术逐步成为盲人理解文字的主要方式。桌面及移动端的操作系统也主要通过按键操作和语音朗读反馈的交互方式。与此同时,触觉相关的辅助设备更多用于特定场景的需要,比如盲文点显器,见图 3.8。

盲文点显器是盲文阅读及认知的一个里程碑。点显器设备通常需要连接电脑,将电脑或网络中的文字信息通过软件转换成盲文的形式,再将盲文以触觉凸点的形式输出,供用户触摸阅读。相比纸质盲文图书,盲文点显器

最大的优点是它依托于网络及计算机中海量的文字内容，进行动态的盲文渲染。



图 3.8　清华启明星 V5 点显器①

盲文点显器目前有包括清华启明星、Metec-AG 等多家厂商的商用产品，但它们的使用和交互方式都比较类似。点显器通常有多达 40 点方，以横向排列，模拟盲文图书的一行文字。点显器左右两端及前端设有功能键和任务键，通常左右两端的按键为上翻页和下翻页。盲人用户在进行连续阅读时，只需要用双手从左至右滑动，阅读点方的盲文信息，到顶端时按下翻页，点显器会立刻换行，延迟时间通常小于 0.1s，用户再回到下一行最左边继续阅读。

作为盲文点显器最重要的部件，盲文点方通常采用压电陶瓷技术实现。其原理为利用双晶片的逆压电效应，给予上百伏特的电压，双晶片会发生物理形变，垂直形变量通常为 0.5～1mm。设备中每个点方有 8 个触点，就有 8 个与之对应的双晶片。设备再通过多个压电双晶片堆叠和扩展，从而实现 40 点方的实时控制。

从设计和交互角度分析，针对连续的文字阅读，用户可以实现连续的触觉阅读和学习，以及通过上下翻页和一些功能键组合实现阅读内容的控制和切换，即盲文的信息输入和按键的信息输出交替进行。点显器的盲文体验可以达到优秀级别。

然而，盲文点显器的使用场景比较局限，即针对计算机及网络中的文字信息的盲文显示。一些业界的机构不断做出尝试，将点显器与电脑进行结合，形成移动 PDA 性质、可进行盲文输入和输出的智能终端。这类设备在一定程度上更便携，可应对更多场景，但其交互方式没有本质变化，依然是盲文的渲染输出和按键的操作控制，所以用户体验的提升有限。

① V5 点显器. http://www.qhqmx.com.cn/dianzijiV5.html.

将盲文点显器从功能上进一步扩展，设备以触觉方式渲染的不仅仅是盲文，还有图形图像信息，即成为触觉图形显示器。触觉图形显示器一般意义上也需要连接电脑，作为识别盲文和图形图像的外设。不过在本书中它的研究意义较高，故而单独拿出一节作为重点内容进行分析和研究。

3.2.5 触觉图形显示器

针对语言文字类信息，盲人用户可以通过录音、磁带以及读屏软件，由真实人声和计算机模拟的声音进行诵读，也可以使用点显器、盲文图书等通过盲文触摸阅读。但图形图像信息如何被盲人学习获取，不管在研究领域上还是业界商用市场上，一直没有得到很好的解决。究其原因，首先，世界本身是物质的、具象的，语言是人们描绘世界的一种途径，是二次的加工，这决定了视觉图形图像的信息量远大于语言文字的信息量，视觉图形图像更复杂。其次，目前没有一种通用的方法能将视觉信息通过语言，尽可能保持其信息量地实现输出，通常担任“视觉讲述”的人都需要经过专业的培训[①]，且都是面向特定的讲述题材。最后，作为信息时代的产物，互联网普遍采用了图形用户界面(Graphics User Interface，GUI)，比如网页排版、配图、视频等，又极大地提升了盲人理解图形图像的需求。

对此，较传统的方法是通过纸张制作触觉图像，比如压印、盲文触点打印、热塑等方式。[②] 通过纸张制作触觉图像的方式单品成本可控、原理相对简明，目前广泛应用于盲人教学。然而作为教具，触觉图像的内容种类有限，纸张不易长时间保存。最重要的是在信息时代的今天，纸张触觉图像无法实时、动态地显示触觉信息，也就无法帮助盲人使用互联网。与传统的纸质材料相对，盲人更需要的是一台能够实时刷新、将视觉的像素替换成触点的电子化触觉显示屏幕，从而快速地获取图像信息，见图 3.9。通过这种可以刷新的触觉图形显示设备，盲人即可用手指感知屏幕中触觉图像的轮廓、疏密等，以一种很自然的交互方式理解触觉图像。[③]

针对人手的触觉能力，多种类型的触觉图形显示器得以相继研发。触觉图案有多种承载方式，给盲人提供多样的触摸体验。根据触觉图形显示

① 中国政协新闻网.《视觉讲述手册》助推盲人观影[OL].[2015.10.07]. http://cppcc.people.com.cn/n/2013/0827/c34948.22701062.html.

② 梁晓. 盲文显示用压电执行器阵列的驱动系统研究[D]. 宁波：宁波大学，2012.

③ 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图形显示器的交互体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2016，28(9)：1571-1576.

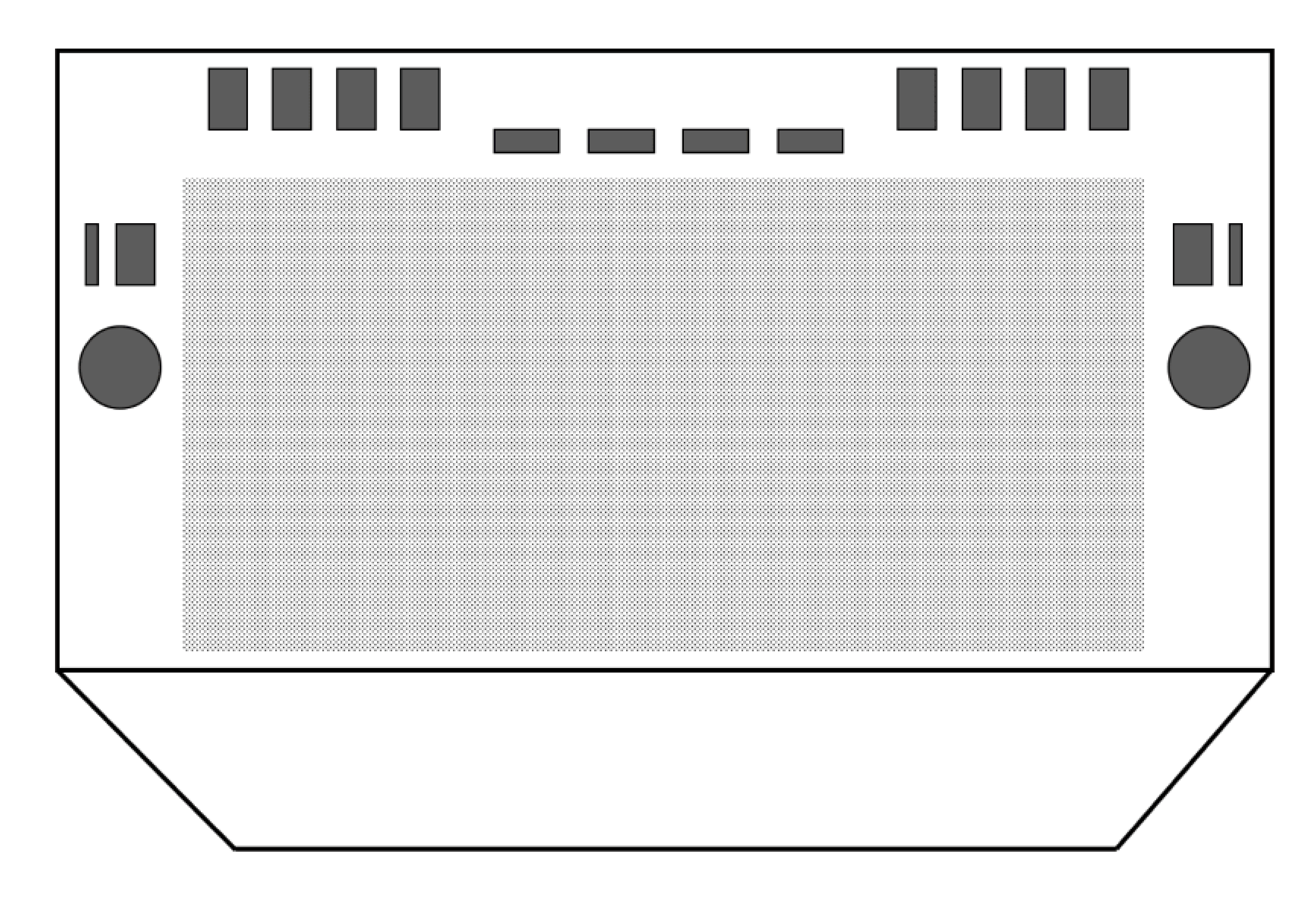


图 3.9　Display 7200 触觉图形显示器

器的驱动特点，可分为热刺激、电刺激和机械刺激，其触摸体验也参差不齐。

热刺激触觉图形显示器即为利用人手对温度的敏感性，由温度变化源组成阵列，通过不同位置的温度差传递位置与温度信息，比如盲人沿着热源摸索平面，理解图形的轮廓。然而，这种方式整体上不成功，最主要的原因在于人手对温度的感知能力有限，感知过程缓慢，且舒适的感知温度区间有限，超出区间会有灼热疼痛感，用户体验很糟糕。所以，目前的热刺激驱动方式一般搭配机械刺激，通过温度的差异模拟纹理变化，提供辅助与增强效果。

电刺激触觉显示器即为利用电流对人皮肤的刺激来传递位置信息。电刺激显示器有其独特的优点：轻巧耐用，没有移动的部件，且便于元器件量产。然而，电刺激触觉显示器还只停留在实验室阶段，原因是电刺激驱动方式无法提供舒适且可被感知的电信号范围，以及缺乏大量用户的统一感知。针对特定的电压、电流、波形等电信号，不同用户的触摸体验也不相同，比如会有刺痛、痒、震动、蜂鸣、疼痛等感觉。因此，电刺激触觉显示器目前还没有推向市场的成熟产品。

机械刺激触觉显示器是目前研究领域最广泛，也是市场产品中出现最多的一种。机械刺激的原理是通过电磁、压电等技术控制点阵中任意点的高度，实现点阵高度差别。这类触觉显示器的显示原理借鉴了传统的触觉图像纸张，即把隆起的触觉图像用一个个高度可控的触点代替，视觉像素点被转化为触点。利用触点的实时可控性，触觉显示器又可分为触点相对固定（静态图形）和手指相对固定（动态图形）的触觉显示器。

触点相对固定是指人手在探索触觉图像时人手在移动，点阵为静止。这种原理延续了传统的纸质触觉图像，易于用户接受，触摸体验较好，如图3.14和图3.15所示的触觉图形显示器。手指相对固定的触觉显示器是指人手在探索图像时是静止的，点阵通过高低控制模拟图像在手指触摸平面上移动的效果，即手不动，图像动。一个经典的例子是前文的Optacon，用户左手放在触点上，右手握持摄像头，使之拍摄图书的一部分；摄像头捕捉书中文字的轮廓，映射到触点的起伏变化；用户操作摄像头在平面内移动，使摄像窗口扫描整个页面，即可跟着摄像头"读"完本页，这需要与用户建立起一套新的交互方式和体验。目前大部分原型和市场上的产品都采用了机械刺激的静态图形触觉显示器。[①] 表3.3为主要的触觉图形显示器及其相关特性参数。

表3.3 主要触觉图形显示器及其相关特性参数

触点固定（静态显示器）					
型号和厂商	时间	刷新时间	触点间距	触摸屏幕尺寸	触点控制原理
DMD. 12060 Metec-AG[②]	1984年	10s	3.08mm	37.2cm×18.6cm 7200点	螺线管（电磁）
BrailleDis 9000 Metec-AG[③]	2008年	小于1s 最小0.15s	2.5mm	30cm×5cm 7200点	压电
Display7200 Metec-AG[④]	2010年以后	小于1s 最小0.15s	2.5mm	30cm×15cm 7200点	压电 & 压力传感器
KGS & NASDA[⑤]	2002年	小于1s	3mm	19cm×14cm 3072点	压电

① 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图形显示器的交互体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2016，28(9)：1571-1576.

② Schweikhardt W, et al. Rechnerunterstützte Aufbereitung Vonbildshirmtext-grafiken in Eine Tastbare Darstellung[D]. Stuttgart: Stuttgart University Press, 1984.

③ Thorsten Völkel, Gerhard Weber, Ulrich Baumann. Tactile Graphics Revised: The Novel BrailleDis 9000 Pin-Matrix Device with Multitouch Input[J]//Computers Helping People with Special Needs-Lecture Notes. Computer Science, 2008(5105): 835-842.

④ METEC. AG. Hyperbraille Display 7200 User's Manual[M]. Stuttgart: METEC-AG, 2014.

⑤ Shimojo M, Shinohara M, Tanii M, et al. An Approach for Direct Manipulation by Tactile Modality for Blind Computer Users: Principle and Practice of Detecting Information Generated by Touch Action[M]//Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2004, 3116: 753-760.

续表

触点固定(静态显示器)					
型号和厂商	时间	刷新时间	触点间距	触摸屏幕尺寸	触点控制原理
DV.1 KGS①	2004 年	小于 1s	3mm	24×32 点	压电
DV.2 KGS②	2004 年	小于 1s	2.4mm	32×48 点	压电
Handytech GWP③		实时	3mm	24×16 点	不详
TIM,ABTIM④		0.04s	2.5mm	4cm×4cm 256 点	压电
NIST & NFB⑤		不详	2.54mm	17.8cm×12.7cm 3600 点	手动写入
Tactisplay walk⑥	2014	8s	2.5mm	15×10cm 2400 点	专利驱动方式
Tactisplay table ⑦	2014	8s	2.5mm	30cm×25cm 120000 点	专利驱动方式
手指固定(动态显示器)					
型号和厂商	时间	力和高度	触点间距	尺寸	触点控制原理
OPTACON⑧⑨	1966 年	6mN;10um	1.27mm 行 2.54mm 列	12.7mm×29.2mm 24×6 点	压电 & 震动

①② Shimojo M, Shinohara M, Tanii M, et al. An Approach for Direct Manipulation by Tactile Modality for Blind Computer Users: Principle and Practice of Detecting Information Generated by Touch Action[M]//Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2004, 3116: 753-760.

③ Handy Tech: HandyTech GWP[OL]. http://www.handytech.de.

④ TIM. ABTIM[OL]. http://www.abtim.com.

⑤ NIST&NFB[OL]. http://www.nist.gov/public_affairs/factsheet/visualdisplay.htm.

⑥ Tactisplay Corp., tactisplay walk[OL]. http://www.tactisplay.com/product/tactisplay.

⑦ Tactisplay Corp., tactisplay table[OL]. http://www.tactisplay.com/product/tactisplay-table.

⑧ Linvill JG., Bliss JC. A Direct Translation Reading Aid for the Blind[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press. 1966, 54(1): 40-51.

⑨ James Bliss, Michael Katcher, Charles Rogers, et al. Optical-to-tactile Image Conversation for the Blind[J]. IEEE Transactions on Man-Machine System, 1970, 11: 58-65.

续表

手指固定(动态显示器)					
型号和厂商	时间	力和高度	触点间距	尺寸	触点控制原理
VirTouch Mouse①	2002 年	0.1N;0.1mm	1.5mm	8×4(点)×3(个)	3D 压电
HAPTAC②	1995 年	0.2N(5×6) 0.6N(3×3)	3mm(5×6) 2.5mm(3×3)	5×6 点 3×3 点	形状记忆合金,风扇制冷

3.3 盲人的触觉认知

以上关于触觉辅助设备的梳理帮助我们建立了盲人触觉交互的大致框架。由于盲人失去了最容易获取信息的视觉,触觉辅助设备的设计者们主要考虑通过触觉通道让盲人学习和理解信息,在一定程度上进行视觉的代偿。因此整个交互过程中,盲人用户如何以快速有效的、易于理解的触觉方式学习获取信息,即盲人的触觉认知,变成了首要问题。

3.3.1 盲人的触觉认知概述

认知的简单含义是认识和感知,而根据《文史知识》,认知的解释为“通过言语、色彩、形体或音响,去理解、体验与表达个别的、具体的事物中的一般意义,以与人、社会、自然和宇宙之最一般或最本质的方面,建立认知的、道德的与审美的联系”③。可见在认知的含义中,认知通道为某种或某些感官通道,认知行为是理解、认识、体验和感知,认知对象是具体事物乃至一类事物中的一般意义。

本课题研究的用户群体是盲人群体,认知通道是触觉,或以触觉为主。因此盲人的触觉认知,狭义上说是指盲人用手或身体接触实体,并理解实体;广义上说是指盲人通过触觉建立的对周围环境和世界的理解。

---

① F Kammermeier P, Schmidt G. Application-specific evaluation of tactile array displays for the human fingertip[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002, 3: 2937-2942.

② Hasser C J. HAPTAC: a haptic tactile display for the presentation of two-dimensional virtual or remote environments[M]. Wright-Patterson AFB: Wright-Patterson AFB Press, 1995.

③ 参见《文史知识》1989 年第 9 期对认知的解释。

E. Bruce Goldstein 在 *Sensation and Perception* 一书中以人的感知角度描述了触觉的认知和识别过程：手指首先受到刺激，注意到刺激物以后，传达到感受器，然后转换成电信号，到达神经进行处理，在进行处理的过程中，知识介入，与储存在脑里已有的经验和记忆对比，形成感知信息，识别出物体，继而进行相应的行动，如图 3.10 所示。

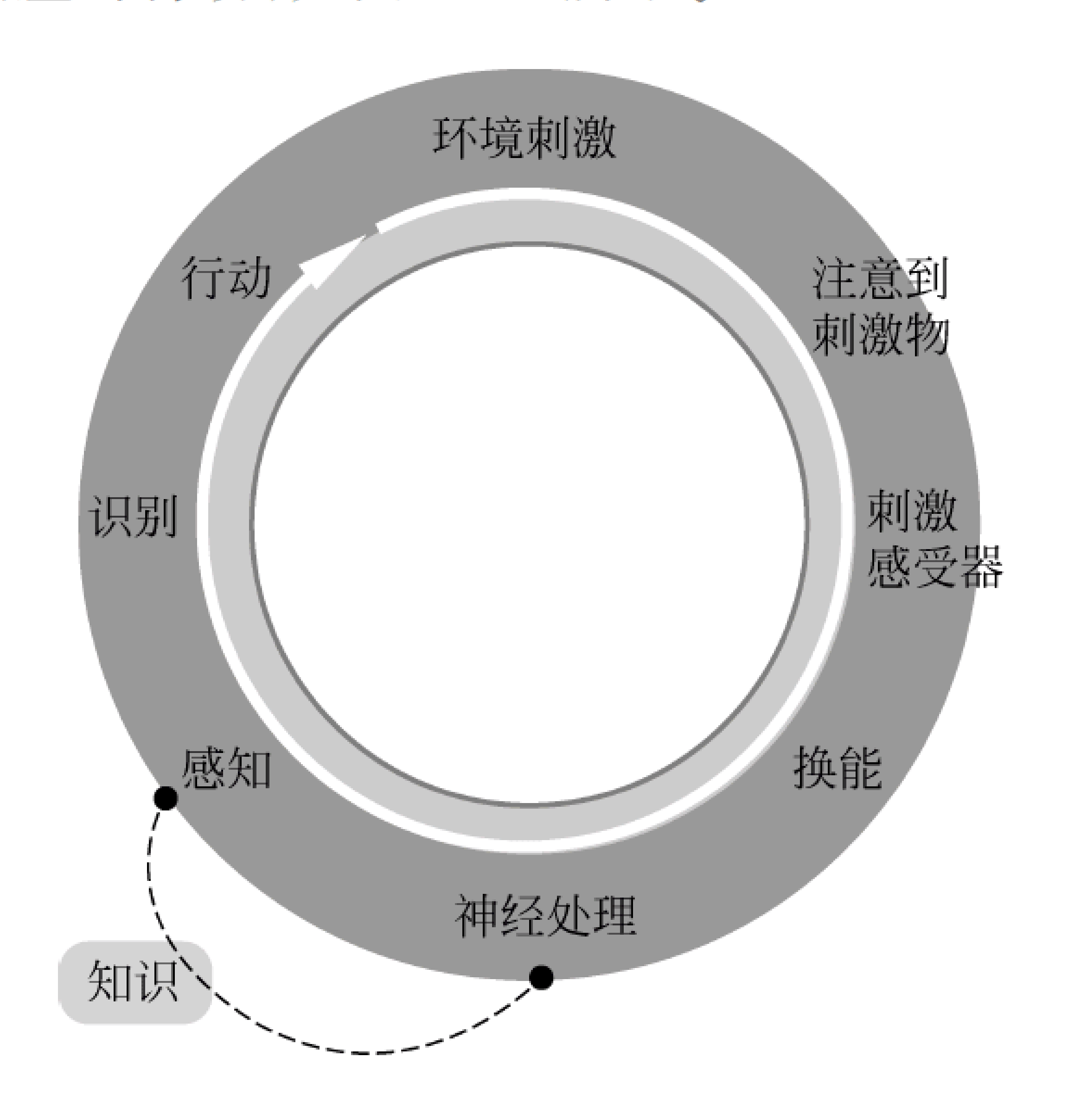


图 3.10　触觉的认知识别过程

针对盲人而言，触觉和听觉是盲人生活中最常用的两个感官。面对自然物理环境，听觉的作用往往相对有限，用户通常需要采用触觉去接触、感受和理解实体。因此触觉认知的方法和能力对盲人用户而言显得非常重要。

3.3.2　fMRI 实验：盲人与明眼人的脑差异

认知的本质是不同的感官将信息以响应的方式传入大脑进行处理，再变成用户可以理解的内容。那么针对盲人群体，他们的触觉认知能力与明眼人是否有差异？在本课题组中，这一研究源于课题组成员亲眼看见盲人用手飞快地阅读盲文(根据国际平均水平，布莱尔盲文的阅读速度为 100 字/分钟)，从而推测盲人经过后天的触摸训练，触觉能力有可能强于明眼人。

针对这个问题，在清华大学医学院洪波教授的指导下，本课题组邀请了三位全盲患者和三位明眼人，年龄在 21～24 岁之间，对六位被试的脑部做了功能性磁共振成像(fMRI)扫描，试图观察盲人与明眼人脑部的视觉区域和触觉区域，如图 3.11 所示。



图 3.11　fMRI 实验场景(洪波)

六位被试的 fMRI 影像结果如图 3.12、图 3.13 所示。

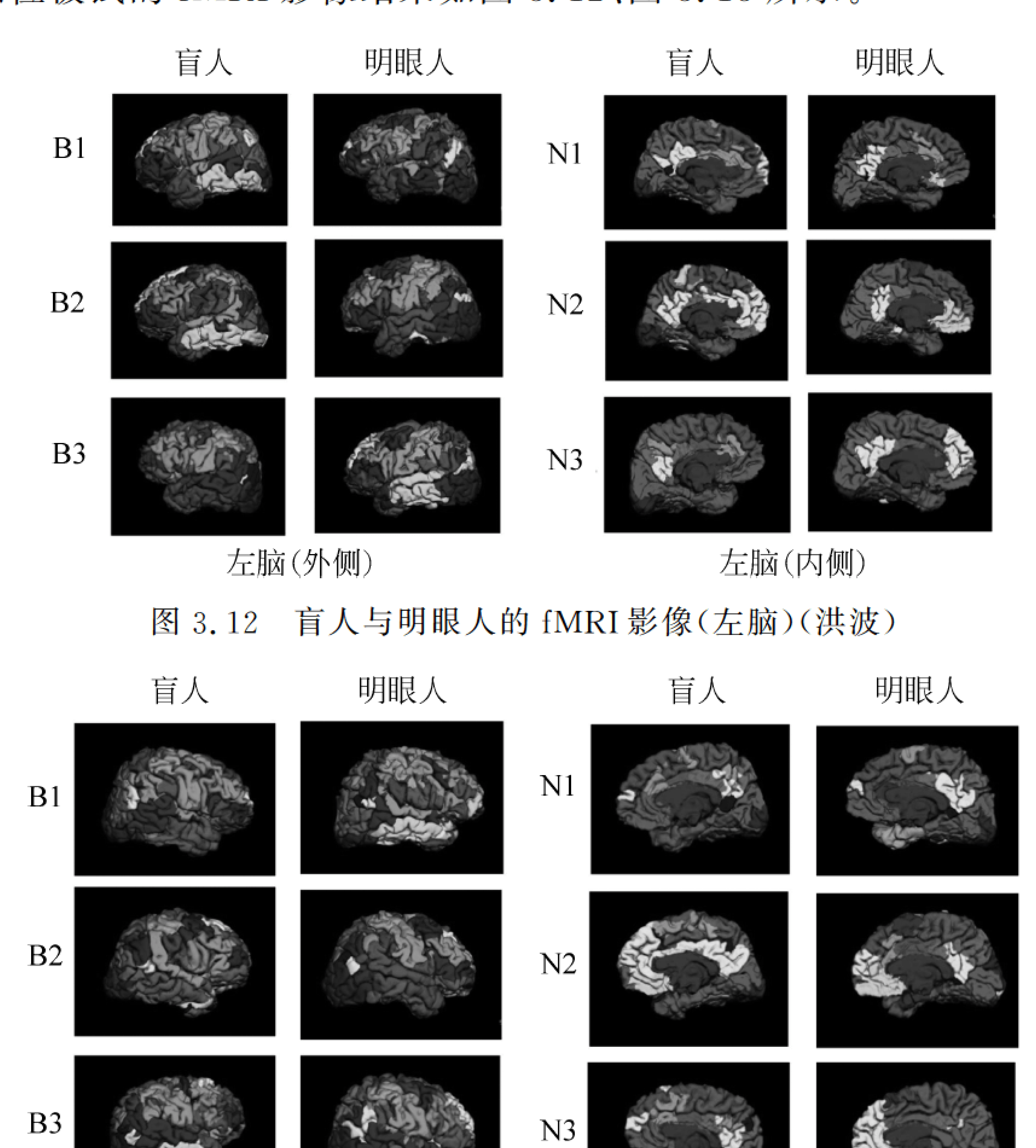


图 3.12　盲人与明眼人的 fMRI 影像(左脑)(洪波)

图 3.13　盲人与明眼人的 fMRI 影像(右脑)(洪波)

通过六位被试的 fMRI 影像，我们抽取了影像呈现的初级视觉区和手部运动区，并比较盲人和明眼人这两个区域在大脑中所占面积。图 3.14 为盲人和明眼人的 fMRI 比较，图 3.15 和图 3.16 分别为 fMRI 数据的视觉和手部运动面积统计结果。

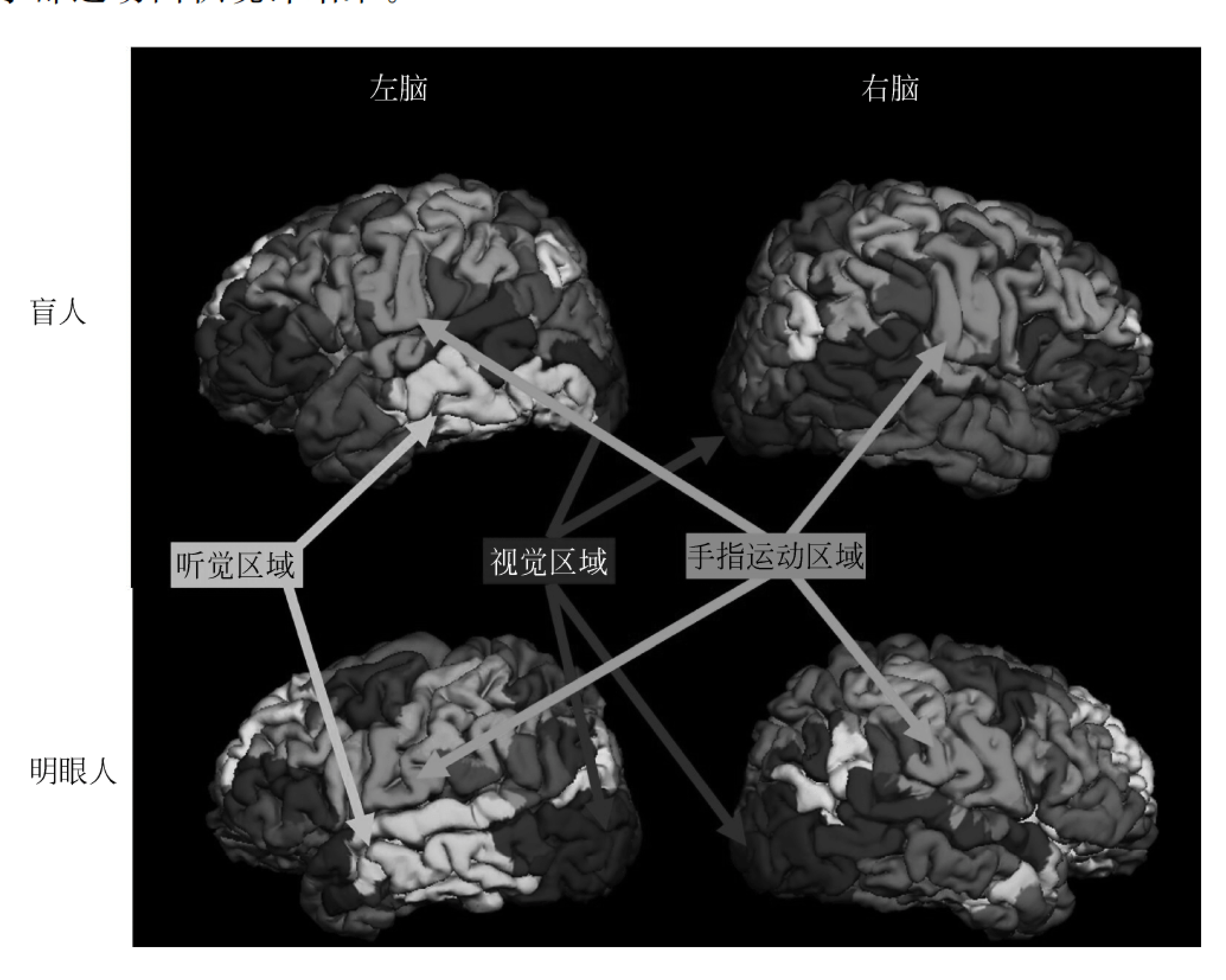


图 3.14　盲人与明眼人的视觉、听觉和手指运动区域对比（洪波）

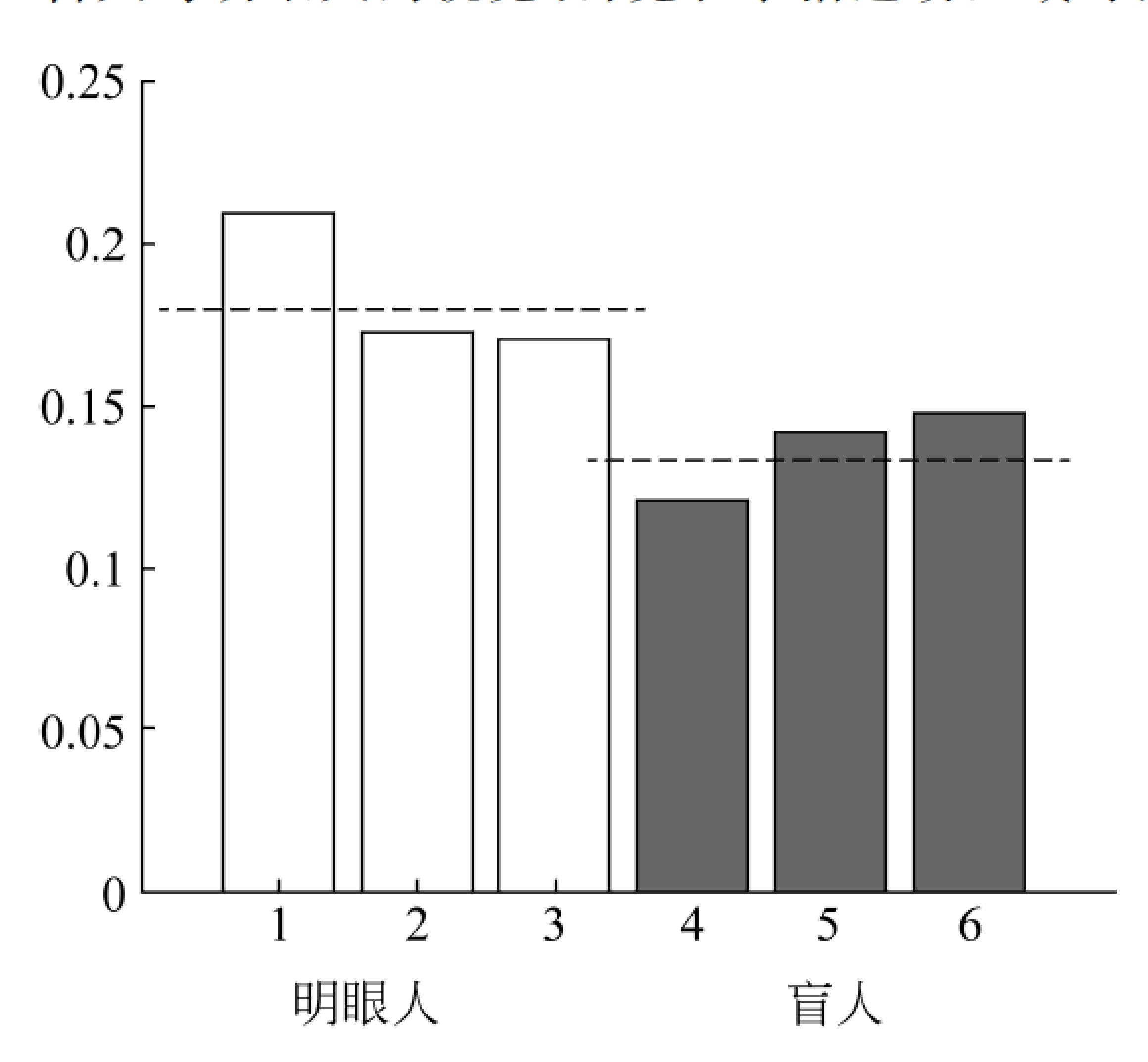


图 3.15　fMRI 影像初级视觉区面积统计结果（洪波）

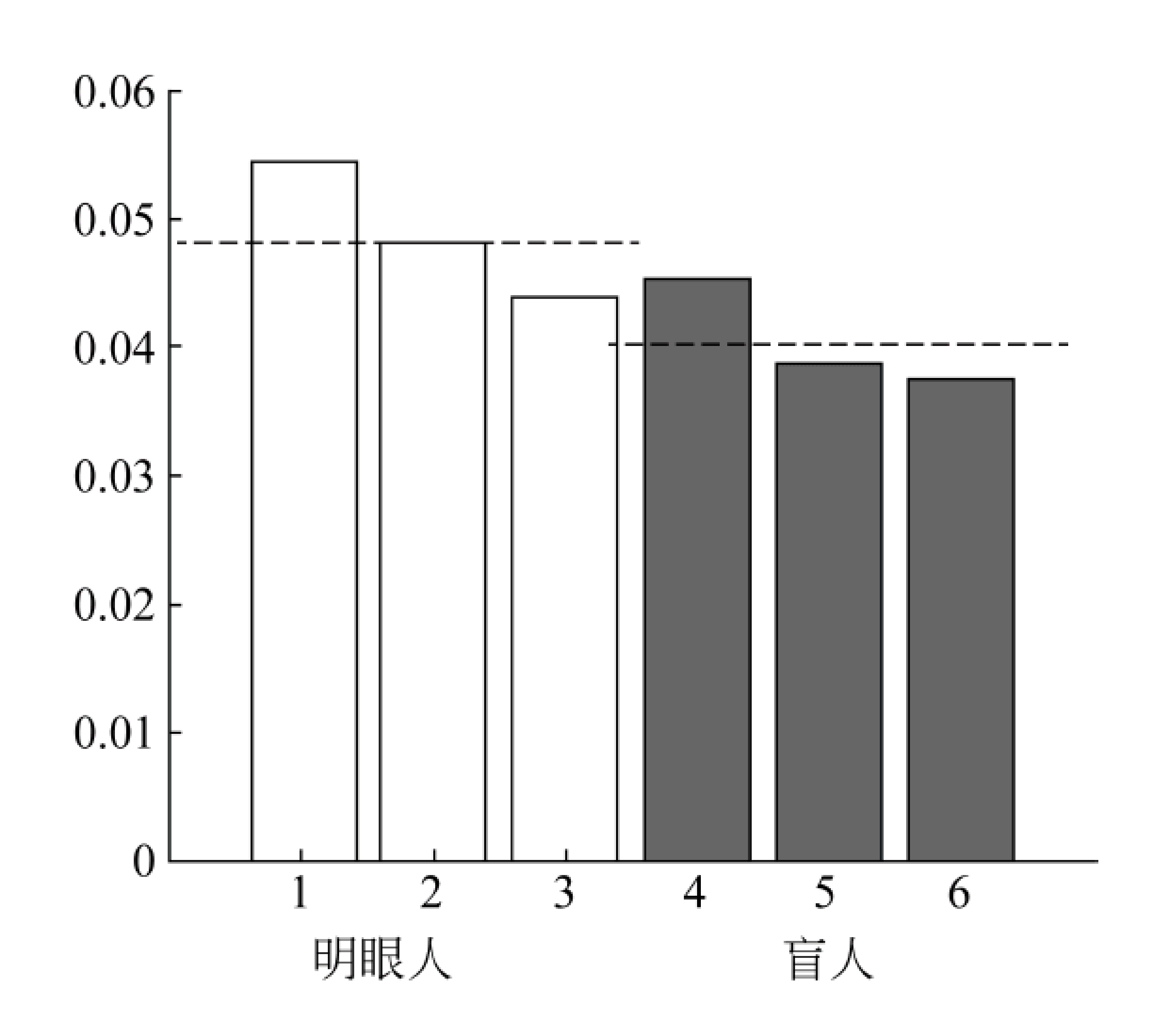


图 3.16　fMRI 影像手指运动区面积统计结果(洪波)

图 3.15 说明盲人初级视觉区域的面积占比显著小于明眼人。其原因在于盲人由于先天失明或在年幼时失明,导致脑部的视觉区域在相当长时间内不能使用,随着人和人脑的发育,人脑的一部分视觉区域逐渐被别的功能所利用,视觉区域面积逐渐变小。这一现象通常被称为神经可塑性。①

图 3.16 说明盲人手指运动区域的面积不大于明眼人,该结论不支持课题组的假设,即盲人的触觉能力优于明眼人。这说明,盲人对于盲文的阅读能力没有体现在大脑的手部运动区域面积上。

通过心理物理学书籍查阅和对相关专家的采访,笔者发现造成这一问题的根本原因在于,盲人对于触觉感受器和神经末梢传递的触觉信息拥有更快的整理和理解的速度,单纯从神经末梢和大脑触觉能力上看,盲人并无优势。换言之,明眼人在相对短的时间内如果系统地学习盲文阅读,加强盲文触觉信息的整理速度,也能达到盲人阅读盲文的标准,即 100 字/分钟。

因此,从 fMRI 影响的结论及分析看,盲人触觉认知能力的提升不在于大脑触觉区域的提升,而在于如何使盲人触摸得到的信息更容易整理和理解。这也回到了本书的核心内容,探讨针对盲人用户的触觉交互设计。

3.3.3　触觉图形图像认知:三维转二维的认知映射

在盲人的触觉辅助设备中,触觉图形图像占据非常重要的地位和作用。从认知角度分析,盲人主要的认知方式有两种:通过语言(包括发声语言和

① 鲁利群,赵聪敏. 丰富环境与神经可塑性[J]. 中国临床康复,2005(9):141-143.

盲文文字)学习和通过身处物理世界感知,而触觉触摸对物理世界的实体学习比较有优势。盲人在学习实体时,直接触摸实体本体是最优的选择,但当实体本体过大(比如“太阳”)、过小(比如“细胞”)、不能触摸(比如“彩虹”)等情况时,直接触摸实体就难以实现,替代方式是可以为盲人制作触摸尺寸合适的模型。事实上,我国的盲人学校均配备了一些模型的教具。但三维模型制作成本较高,制作周期较长,在频繁触摸使用后容易损坏,且不易储存。

相比模型的弊端,触觉图形图像更有优势,3.2.5 节触觉图形显示器阐述了纸质触觉图形图像的种类。触觉图形图像广泛应用在盲人教科书中,比如课本的插图、图表,甚至盲人考试卷中也都用触觉图像来表示。那么触觉图像是如何被盲人认知的?其认知过程和特点是怎样的?

(1) 空间到平面

盲人由于视力受损,尤其有很多先天盲或在幼年时致盲的群体,他们并没有物理世界的视觉经验,只能依靠触觉建立某一个实体的轮廓形状、材质纹理等触觉经验,而这种触觉经验是三维的、空间的。

与之对比,明眼人习惯用视觉作为物理世界的主要认知方式,将物理空间的三维视觉信息投射到眼睛的视网膜上,产生二维场景,被视神经读取和认知。也就是说明眼人对于二维平面图像的认知是日常的、经验性的。人们根据具身的视觉经验,总结得出了“透视(perspective)”原理,即在平面上,用线条来显示物体的空间位置、轮廓和投影的原理与方法,见图 3.17。明眼人因此广泛使用平面的图形图像来记录和表达信息。

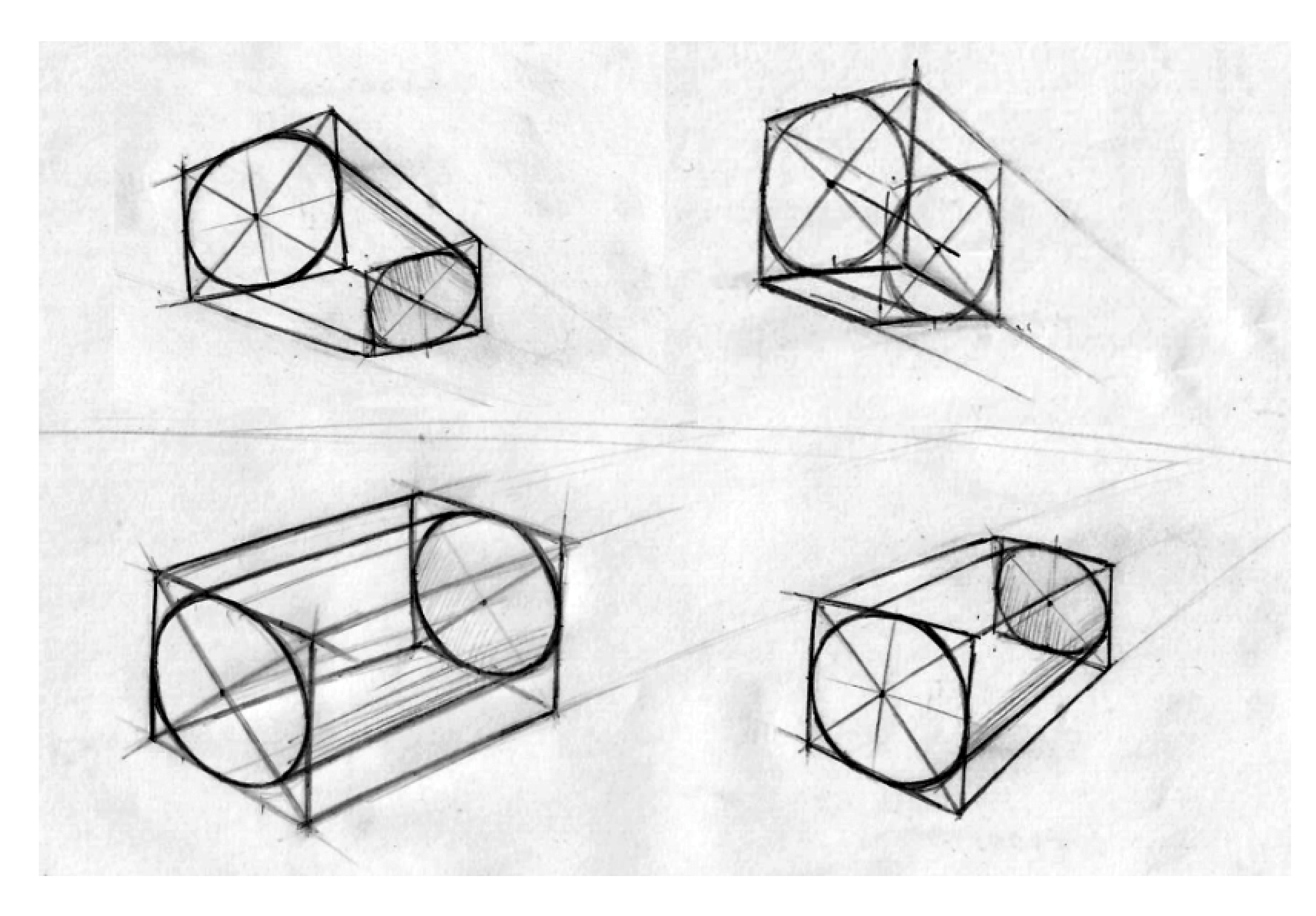


图 3.17　透视举例

通过以上分析，盲人与明眼人在对物理世界的认知方式上呈现显著差别，对盲人来说，他们需要通过后天的知识学习建立物理三维世界的实体与平面二维的透视图像的关联。而由于盲人群体没有明眼人的透视经验，这种空间到平面的关联使得他们只能通过触觉的经验记忆和联想，从而建立映射。尤其在面对复杂透视的平面图像时，他们的学习成本非常大。

因此，在针对盲人的触觉图像设计时，触觉图像往往被设计成平面的、非透视的，如平面图形、地图、物体的横切面等，使空间的物体与平面图像尽可能在相对比例上保持一致，便于盲人用户的触摸理解。但尽管如此，某些物体的横切面选取角度如果不同，盲人触摸的认知结果也会有显著不同，归根结底还是由于盲人缺乏三维物体的视觉信息所导致的。概括地说，由空间到平面的转换，成为盲人认知触觉图像较大的障碍。

（2）局部到整体

当明眼人看到一个物体时，通常会先看物体的整体，认识物体的类别、特点等整体信息，再根据需要关注物体某个部位的细节。这种认知方式是由视觉认知特点决定的。视觉的“认知视窗（window）”很大，可以快速完成整体的认知和把握。

与明眼人相比，盲人群体在用手指进行触觉触摸认知时，一个很大的瓶颈是手指的感受区域较小。在第 2 章触觉的生理分析中，我们得出手指尖区域的皮肤拥有相对高的触觉敏感度和触觉运动能力，但是每一个手指尖区域的皮肤面积仅约 $2cm^2$，认知视窗明显小于视觉。这限制了盲人用户把握触觉图像整体的能力。通常情况下，盲人用户需要将触觉认知视窗从触觉图像的某个局部开始，通过视窗的移动，获取多个局部信息，并逐渐拼成图像的整体信息，比如中学生物教材中 DNA 的插图，见图 3.18。该图信息量较大，用户需要用手将局部细节逐步触摸理解，才能推知整个图像的意义。

然而，由局部信息到整体信息的过渡过程要求用户比较完整地记忆每个局部的触觉信息，如果忘记了其中之一，用户还需通过触觉找回原局部，而找回过程也需要花费精力和记忆力。

（3）直线到曲线

由局部到整体的认知过程衍生出了直线到曲线的问题。盲人用户一般都能胜任触觉图形中的直线，但对曲线，尤其是不规则的曲线，通常感觉比较困难。比如盲人通常难以准确触摸并理解一条曲线的走向、趋势，如果图像中涉及多条曲线，且曲线间有相互交叉与重叠，那么大多数盲人都无法触摸理解。

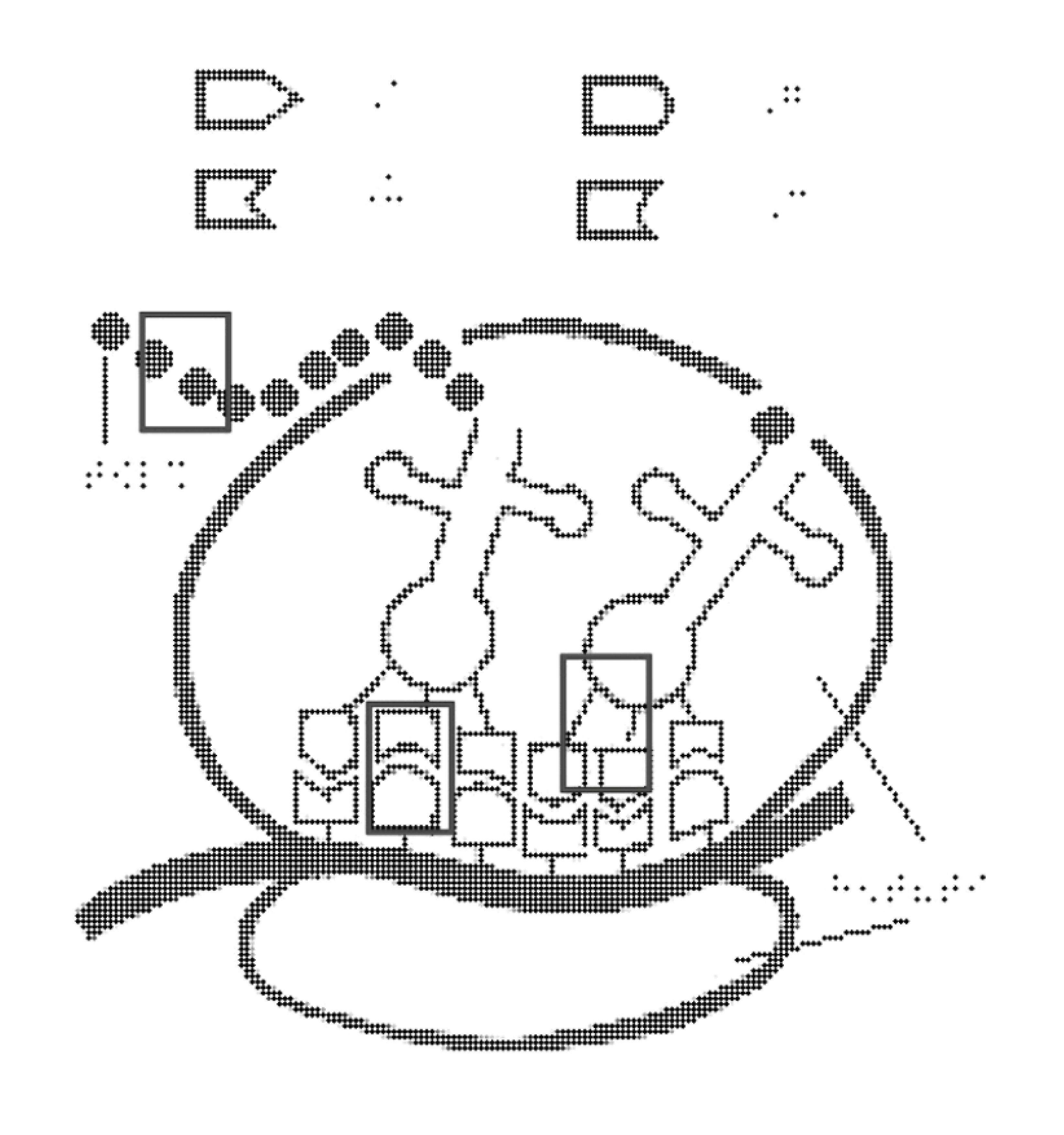


图 3.18　DNA 触觉图像,Tiger 设备打印,来自北京盲校中学生物教科书

造成该问题的原因有二:第一,盲人的触觉视窗相对较小,这依然制约着曲线的认知理解。因为曲线的信息量远大于直线,用户在触摸时,会得到曲线的曲率、偏向、走势等大量信息,在手指移动时,前面的信息容易丢失。第二,由于触觉图像的制作限制,触点打印的触觉图像的分辨率有限,一般 Tiger 设备打印的图像触点分辨率约为 1mm,呈正方形排列,以等距的水平和竖直方向排布。因此,在描述曲线信息时,凸起的触点会以斜向延伸,包含曲线信息量的触点间距会更大(比如 45°时,间距为 $\sqrt{1^2+1^2}=1.4$mm;26°时,间距为 $\sqrt{1^2+2^2}=2.2$mm;16°时,间距为 $\sqrt{1^2+3^2}=3.2$ mm)。更大的间距带来更弱的精确度,就给盲人用户的认知造成了更多的困难。

3.3.4　触觉带宽显著小于视觉

就图形图像而言,视觉是信息获取能力最好的感官,跟随其后的是听觉

和触觉。视觉的带宽大约是听觉的 100 倍，触觉的 10000 倍。[①] 换句话说，触觉的带宽只有视觉的万分之一。[②]

需要注意的是，“带宽”是人感官的理论上限，而根据目前在虚拟现实领域的多感官研究，在信息的输入获取方面，视觉大约占比 70%，听觉占比 20%，触觉占比 10%。相比之下，每次触觉在进行摸读的时候能够获得的信息量显著少于视觉，这就是为什么在触觉图像中，只需要保留最重要的和具有区别性的特征信息。

3.4 触觉图形图像认知实验规划

如上文分析，尽管盲人用户对触觉图形图像的认知有以上困难，但受限于盲人触觉材料的制造，针对盲人的触觉图形图像依然是目前世界范围内的通行方法。一般情况下，触觉图形图像会搭配布莱尔盲文，广泛用于盲人的说明文档、地图以及教科书中。

因此，本章的重点研究问题是：什么样的触觉图形图像、如何设计触觉图形图像、采用何种条件的触觉认知方式，会更便于盲人用户对图形图像的认知和理解？

课题组研究人员在前期进行了几百张触觉图形图像的收集，来源包括国内盲人学校的教科书插图、北美盲文机构（Braille Authority of North America）、美国盲文出版社（American Printing House for the Blind, Inc.）、德州第 4 区教育服务中心盲文中心（Braille Center, Region IV Education Service Center）、加拿大国家盲人研究所（Canadian National Institute for the Blind）、ViewPlus 技术公司等。每个实验涉及的触觉图像都是已有的图像，课题组没有额外做图像的设计改动。

根据本章针对盲人的触觉交互和认知的研究思路，课题组对触觉图像如下几个维度进行盲人触觉认知表现的研究：

（1）不同图像尺寸；

（2）静态图像与动态图像；

---

① 江宁. 面向盲人的图形显示设计方法及其用户体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2011，23(9)：1539-1544.

② KJ Kokjer. The Information Capacity of the Human Fingertip[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1987(17): 100-102.

（3）图像的主动与被动认知交互方式；

（4）触听觉多通道认知交互方式。

课题组邀请了 16 位全盲患者参与实验。16 位盲人主要来自几所盲人学校和盲人高等教育学院，以及两位工作于社会助盲机构的中年盲人，其中男性 12 人，女性 4 人。相关信息如表 3.4 所示。

表 3.4　16 位实验对象信息

序号	名称	年龄	性别	是否全盲	致盲时间
1	Guang	30	男	是	23 年
2	Di	24	男	是	22 年
3	Chenlin	25	男	是	10 年
4	Yongzhou	43	女	是	35 年
5	Guanchong	24	男	是	24 年
6	Zhipeng	18	男	是	6 年
7	Jing	22	女	是	17 年
8	Yang	26	男	是	20 年
9	Xiaojun	23	男	是	13 年
10	He	24	男	是	16 年
11	Sen	20	男	是	16 年
12	Xuan	17	男	是	12 年
13	Jun	19	女	是	11 年
14	Yan	19	男	是	7 年
15	Hong	23	女	是	12 年
16	Wenyu	45	男	是	28 年

3.5　实验 3.1：不同图像尺寸的认知实验

3.5.1　实验目的

由于触觉图像的触觉分辨率限制，单位面积中图像信息量过多会显著影响认知效果，因此将图像放大，降低单位面积的图像信息量是直接的解决方法。然而考虑到手指皮肤面积有限，过大的图像会降低触觉视窗的效率，同时受到触觉图像成本的限制，过大的图像制作成本较高。因此，实验 3.1

意在探索何种尺寸的图像最能帮助盲人用户对触觉图像的认知理解。

3.5.2 实验设计与方法

首先在实验设计阶段，触觉图像的尺寸需要进行定量分析。根据目前盲人群体接受的触觉图像的教育现状，以及目前市场上触觉图像的材料，我们得到以下结果：

第一，触觉图像分辨率的选用。在第2章触觉的心理物理学研究综述中可知，人手指的触觉分辨能力极限约为1mm，Tiger设备打印的触觉图像点阵间距约1mm。但布莱尔盲文点间距的国际标准是2.5mm，市场上也存在一些点间距2.5mm的触觉图形显示器原型。考虑到2.5mm间距是盲人图书的国际标准，以及触觉图形显示器的发展趋势，本实验采用分辨率为2.5mm的触觉图像进行认知测试。

第二，触觉图像的尺寸界定。本实验的主要目的是探索更适合盲人触摸认知的触觉图像尺寸，考虑到触觉图像的制作工艺和成本，课题组研究人员没有能力制作多个尺寸类别的触觉图像。因此，我们回到现有的触觉图像中寻找参考尺寸。

目前的纸质触觉图形图像多为教科书插图和数学、物理、化学的专业原理图，多用Tiger设备打印，通常一张A4纸能容纳1～3个图。触觉图形显示器产品的触点尺寸差异依然较大，比如Optacon设备点阵数量为6×24点，KGS公司的DV-1为24×32点，Metec-AG公司的HyperBraille Display 7200拥有60×120点。综合考虑了制作成本和现有图像尺寸后，本实验选取了三种触觉图像的制作尺寸：

- 小图，20×30触点，点间距2.5mm，实际尺寸5×7.5cm，对应DV-1等小尺寸设备和教科书中的小幅面图像；
- 中图，40×60触点，点间距2.5mm，实际尺寸10×15cm，对应教科书中占据一页的中等幅面图像；
- 大图，60×90触点，点间距2.5mm，实际尺寸15×22.5cm，对应Display 7200等大尺寸设备和教科书中两页的大幅面图像。

值得注意的是，以上尺寸是图片的实际尺寸，一般情况下由于图书页边距的设置，图书尺寸会大于图形尺寸。因此“大图”是目前盲文教科书中两页图像的尺寸。

第三，触觉图像内容的选择。为了保证触觉图像的可认知性，本实验选用了国内盲人学校的数学几何图形（math，简称M）、物理电路图（physics，

简称 P)和生物皮肤结构图(biology,简称 B)各一张,每个图形分别制作小图(1)、中图(2)、大图(3)三种尺寸,不同尺寸的图像内容严格一致,仅为等比例缩放。总共需准备 9 张触觉图像,见表 3.5。9 幅触觉图像均使用 PCB 洞洞板和标准大头针制作,制作工艺一致。

表 3.5　实验 3.1 所需之触觉图像

	小图(1)	中图(2)	大图(3)
数学几何图形(M)	M1	M2	M3
物理电路图(P)	P1	P2	P3
生物皮肤结构图(B)	B1	B2	B3

为避免学习效应,相同内容的图像仅能触摸一次,因此,每个盲人需触摸不同内容的小图、中图、大图各一幅,按伪随机顺序从 9 张图中选取。实验人数需为 3 的倍数,故从 16 名被试中选择 15 人参加实验。然后按被试的理解状态口述图像内容,主试记录图像触摸的相对时间和图像理解的信息完整度。信息完整度由触觉图像的出处——盲人学校的相关课业老师来设定评价标准,最后将每种尺寸的图像归类,从而得到时间和信息完整度的统计数据。

以此实验方法,得到实验流程:

1. 被试入座,播放实验引导语:"本实验是为了评定不同尺寸触摸图片的认知程度,实验者会先后将 3 张触觉图像逐一放置在您前方的桌面上。第一,请您快速并全面地触摸理解,实验者会记录触摸时间,您认为理解完毕后,请告知。第二,请您按您的理解,用语言尽量完整全面地描述该触摸图像包含的所有信息。"

2. 被试准备完成,开始触摸和计时;

3. 被试触摸完毕,计时结束;

4. 被试对该图像进行语言描述,实验者详细记录,并依照每幅图事先准备的信息完整度量表严格比对,最终以百分比形式得到被试对该图的认知程度。

3.5.3　实验结果、分析与结论

由表 3.6 可以看出,随着图像点阵增加,平均触摸时间略有增加,但信息获取完整度有显著提高。小图、中图与大图的平均触摸时间两两比较均无显著性,以小图和大图为例,触摸时间均值和标准差在置信区间内($t=$

1.51<1.70，p=95%)。相比之下，平均信息完整度两两比较均有显著性，小图和中图信息完整度显著差异(t=10.29>1.7，p=95%)；中图和大图信息完整度显著差异(t=2.50>1.70，p=95%)。在实验中，盲人触摸小图时普遍出现理解困难，往往无法触摸理解图像细节而结束；较大图像虽耗时略长，但盲人用户往往能理解更多细节信息，整体理解完整度更好。主要原因在于触觉图形的分辨率恒定为2.5mm，在小图中，更多的图像信息会被压缩于相邻点中，图像变得更“模糊”了，同时放大了分辨率的弊端。而随着图像尺寸的增大，手指的触觉视窗尺寸并无显著负面作用。原因在于盲人用户手指的移动非常灵活，抵消了手指皮肤面积的局限。

表3.6　实验3.1不同图像尺寸的认知实验统计结果

	平均触摸时间(s)	标准差	平均信息完整度(%)	标准差
小图	38.7	6.5	33	12.8
中图	42.3	7.3	77	10.5
大图	43.3	9.8	87	11.4

实验结论：在日常图书尺寸的范围内，大尺寸的触觉图像更易于盲人用户的触觉认知和理解。

3.6　实验3.2：静态图像/动态图像的认知实验

3.6.1　实验目的

在3.2节触觉辅助设备的分析中，目前的触觉图形显示器按显示方式可分为静态图像显示器和动态图像显示器。由于这两种图像显示方式影响到了图像显示器在点阵尺寸、驱动方式等多处的设计，因此在针对盲人的触觉交互研究中，静态图像与动态图像具有非常重要的研究价值。

静态图像的由来和设计思考相对简明，即以视觉的图形图像为参考，将信息通过二维或2.5维的方式，以触觉形式呈现。

而动态图像的设计思考非常值得剖析。它的设计之初考虑到用户手指的触摸面积较小，因此将整幅图像在某一时刻分成有效触摸区域和无效区域。同时，得益于类似Optacon的动态显示能力，一幅图像的动态显示区域可以任意调整。

动态图像的设计，还考虑了用户在触摸时，手部皮肤与触觉图像的相对移动。在触摸静态图像时，图像静止，人的主动运动系统与皮肤感觉系统同

时工作,进行图像的触摸理解。但触摸动态图像时,人的手指相对静止,意味着主动运动系统没有工作,仅由被动的肤觉感知触觉信息。而用户在理解动态图像时,图像窗口的移动通常由另一只手来控制,比如 Optacon,用另一只手移动摄像头。或者一般性地说,另一只手可以通过某种控制端,使动态图像系统变换图像窗口。

所以,静态图像与动态图像对于用户认知的根本区别,在于是否使用人手的主动运动系统来改变图像窗口。因此,实验 3.2 研究这两种认知方式在认知能力和交互体验上的差异。

3.6.2　实验设计与方法

我们利用点显器的一个点方(8 点,呈 4 行 2 列排列,点间距 2.5mm)模拟 Optacon 的交互方式,显示动态图形和动态文字,其动态刷新由盲人用户控制。16 名盲人用户每人使用 30min 阅读预设文字和图像内容(取自盲人学校高中教科书),在使用的前 5min 和最后 5min 内分别回答:相比平时学习的材料,使用此设备的理解速度如何?使用的舒适性如何?盲人用户针对这 2 个问题以 1～10 分为限进行打分,1 分最低,5 分为平时使用静态图形的基准体验,10 分最高。

3.6.3　实验结果、分析与结论

16 位盲人分别触摸随机图形,并据此得出图像理解的速度和舒适度,其平均值和标准差见表 3.7。

表 3.7　动态图形认知实验结果

		平均值	标准差
前 5mm	速度	2.62	0.81
	舒适度	2.06	0.99
后 5mm	速度	3.37	1.14
	舒适度	2.18	0.83

由表 3.7 可以看出,动态图形在速度和舒适度上均不如传统的静态图形(与静态图形的 5 分基准分比较),且呈显著差异(以后 5mm 速度为例,$t=5.71>1.69, p=95\%$)。即使经过 30min 的使用训练,读图速度也离 5 分基准状态很远,而读图速度的不佳直接导致焦虑等负面情绪,舒适度也远不如静态图形。

造成动态图形体验不佳的原因在于用户需要准确地了解动态触觉图像所对应的静态图像的位置。换言之，动态图形触觉显示器只承载了大尺寸触觉图像的某处细节，触觉信息的承载窗口过于局限，又增加了用户对图形理解的记忆量。而且，动态触觉图形还需要相当长时间的学习过程。因为Optacon不管是针对图形还是文字，其触觉呈现都是图像轮廓的方式。用户阅读文字的速度尚且不及静态的布莱尔盲文，针对更难理解的图形图像信息，其认知效果更难以保证。因此，动态图形显示器目前只停留在研究阶段，还没有成熟的商用产品。

3.7 图像的主动/被动认知交互方式与触听觉多通道认知

基于实验3.1和实验3.2，初步的结论是：相对大尺寸的静态图像具有更好的认知效果。而这两个实验都是针对图像材料的分析，盲人在触摸过程中的因素没有考虑。因此实验3.3旨在探索在盲人的触觉认知过程中，采用何种外界方式，能影响或提高盲人的认知理解能力。

3.7.1 图像的多通道认知设计

2.5.3节综述了信息交互设计中多通道的相关研究。以一般群体为目标用户，视觉、听觉和触觉的多通道方式开辟了多个研究领域，具有多种交互效果。针对盲人群体，也已有一些多通道的相关研究，主要针对盲人的触觉和听觉通道。比如Dominique Archambault等人为盲人研发了一个游戏系统，通过布莱尔盲文、3D音频和语音合成的多通道方式实现。[1]

事实上，对于一幅图像的直观描述和内在含义，如采用语言的方式，也能完成一定信息的表达，只是语言解释和描述更具抽象性，与实体的触觉图形图像形成对比与互补的关系。

因此，将图像的触摸理解和图像的语言解释以一种合理的设计方式呈现给用户，将能在很大程度上提升盲人对图像的认知理解效果。具体触摸和语言描述呈现方式的设计有如下两种思路：

① Dominique Archambault, Damien Olivier. How to Make Games for Visually Impaired Children[C]. ACE '05 Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, pp. 450-453.

(1) 触摸从局部到整体,语言描述从整体到局部

在 3.3.3 节中,由于人手指皮肤面积有限,触摸只能从局部开始理解细节,逐渐推知整体,即从局部到整体。事实上,“整体”的理解大多是一个“定性”的抽象的概念,例如这幅图像“是什么”。盲人在过去的经验中学过这个概念,在多个局部的触摸过程中会逐渐建立局部到整体的推理,直到盲人确认推理,从而最终理解。因此,在这个过程中,如果盲人以听觉的方式被告知这幅图形抽象的整体概念,很显然能帮助盲人完成上述通过逐步触摸才能理解的任务。

因此从图像理解的趋势上分析,一幅图像包括各个细节信息和它们组成的整体信息。触摸理解可以从局部开始,语言描述可以从整体开始,从而实现头尾并进的图像认知和理解。

(2) 触摸与语言描述同步

在触觉与听觉同时进行的情况下,跨通道一致性(见 2.5.2 节的综述)需要被特别考虑与关注。以此为设计原则,所触摸的内容应与语言描述的内容一致,盲人所触摸的局部信息,就是盲人正在听的局部信息的语言介绍。

以上两种设计思路看似是相反的,但以盲人的最佳认知为出发点,整个认知过程需要通过设计将两种思路融为一体。

通过用户观察,盲人虽然无法快速通过触摸理解图形整体,但一般会把双手摊开在整个图像上,对图像中触觉点阵的排列有一个初步概览。这表明了盲人意欲对整个图像有一个“实体”概念(这些点阵都在哪里)。如果能在这时引入语言,描述这幅图像的“抽象”概念(这幅图像是什么),就可以实现触觉与听觉完全同步的关系。而后,盲人触摸图像的局部细节,此时再引入针对该局部细节的语言描述,又可以实现触听觉的同步。所以,通过触觉和听觉,盲人对该幅图像的理解方式大概为“整体—局部—整体”:首先在抽象上了解图像的定性信息,然后逐步把握细节,最后通过全部的细节,对整体的图像产生最佳的认知和理解。而整个过程基本处于触觉触摸与听觉语音的同步状态,最大化地考虑了跨通道一致性问题。

3.7.2　图像的主动/被动认知设计

上节讨论了盲人在触摸图像局部时,引入针对局部的语言描述。这引发了第二个问题,即多个局部之间,是否有特定的顺序?该问题涉及触摸的顺序和语言描述的顺序。从一幅图的整体性上考虑,特定的描述和理解顺

序是需要的。对此，笔者采用访谈法和观察法，与盲人学校的师生们进行了较深入的交流，并有幸旁听了盲人学校的中学数学课，在设计理念上取得了很大的收获。图 3.19 为盲人学校中学生写盲文和触摸纸质图像学习的场景。

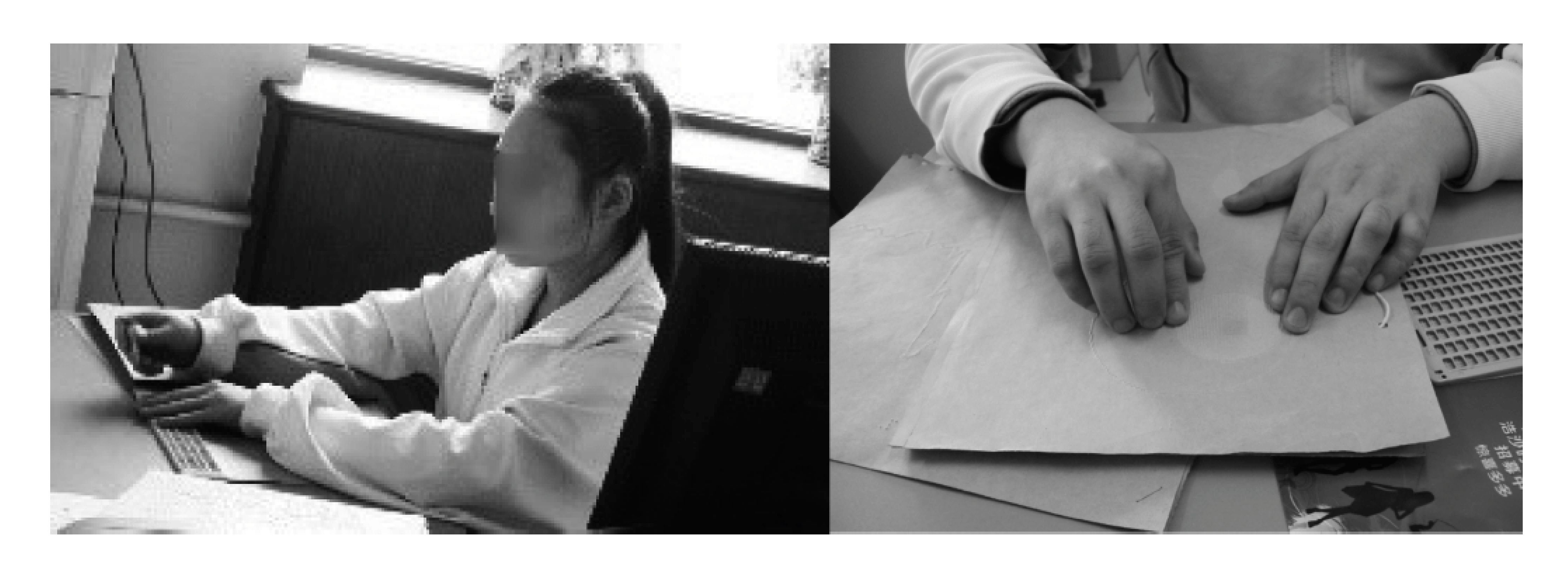


图 3.19 盲人学校学生学习读写(江宁拍摄)①

在数学课上，老师教学生理解“正四面体”的概念，即由四个等边三角形组成的立体图形。学生触摸如图 3.20 所示的触觉图像，由 ViewPlus 的 Tiger 设备打印制作。在教学过程中，老师采用逐步讲解的方式，让学生分层次理解该图形。整个理解的过程非常有启发性。

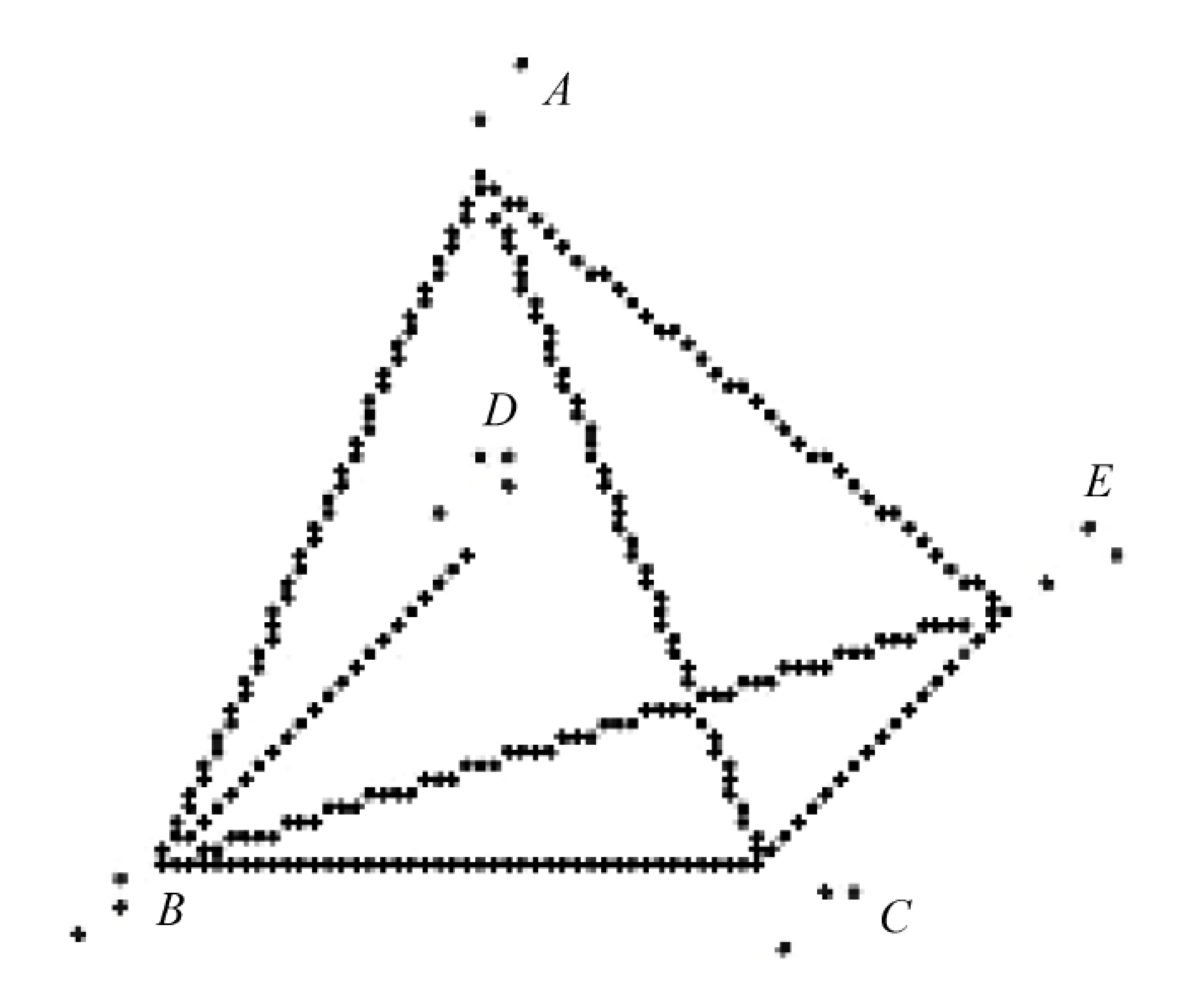


图 3.20 正四面体的触觉图像，来自盲人学校中学数学教科书

① 江宁. 关于触觉交互的辅助设备研究——盲人触觉交互设备设计[D]. 北京：清华大学，2011.

首先，老师用语言讲解正四面体的整体概念："由四个顶点，四个等边三角形组成。"此时大多数盲人学生没有反馈，表示不理解。然后老师开始从图形的局部带领学生理解：

"先找到点 A、B、C，构成$\triangle ABC$，它正对着我们，然后点 D 位于$\triangle ABC$ 所在的平面上，因此线段 BD 也在该平面上。接着找到点 E，请注意，它不在$\triangle ABC$ 平面上，而在该平面的斜后面。然后触摸$\triangle ACE$，它在图形的右侧。这两个三角形都对着我们，我们摸到的是它们的正面。最后，还有另外两个三角形$\triangle ABE$ 和$\triangle BCE$，它们分别在该图形的背面和底面，在图形的角度中它们是隐藏的，我们摸到的是它们的背面。"

经过以上讲解，大多数学生表达了积极的反馈。这种讲解和认知方式大大提高了盲人理解图像的能力。因此这种思路应该被设计，并尝试应用到普适的图形图像的理解中。

对该讲解方式进行分析，我们发现它的几个关键步骤：整体讲述，将图像按其逻辑内容分层，并带领学生逐步理解，而按逻辑内容分层是极其重要的一步。如果盲人的触摸次序被打乱，比如先摸到了$\triangle ABE$ 等，那么就会对图形的正确理解造成严重的负面干扰。在该图形中，点 A、B、C、D、E 起到了明确的标注作用，按照老师的讲解，盲人基本会按照此触摸路径。但对于一般图像，设计者需要建立一种"示能"(affordances)与"限制"(constraints)[①]，即根据图形的逻辑和语义分析，生成一种理解图形的最优路线。盲人用户在该路线上探索，能感受到功能可供，在其他路线上探索，能感受到限制。

基于这样的交互认知的要求，我们设计了触摸引导系统，由引导环和二维平面运动支架组成，如图 3.21 所示。

盲人用户在使用时，触摸手的食指套入引导环中。系统工作时，引导环由二维平面支架控制，在触觉图像的上方，按对图像的逻辑和语义分析后得出的最佳路径移动。以此实现动态的功能可供和动态的限制，帮助盲人理解图像。

针对被动的触摸引导系统，引导环的尺寸和形状的设计是至关重要的，

① Sean Follmer, Daniel Leithinger, et al. inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation[C]//Proceedings of UIST 2013, ACM.

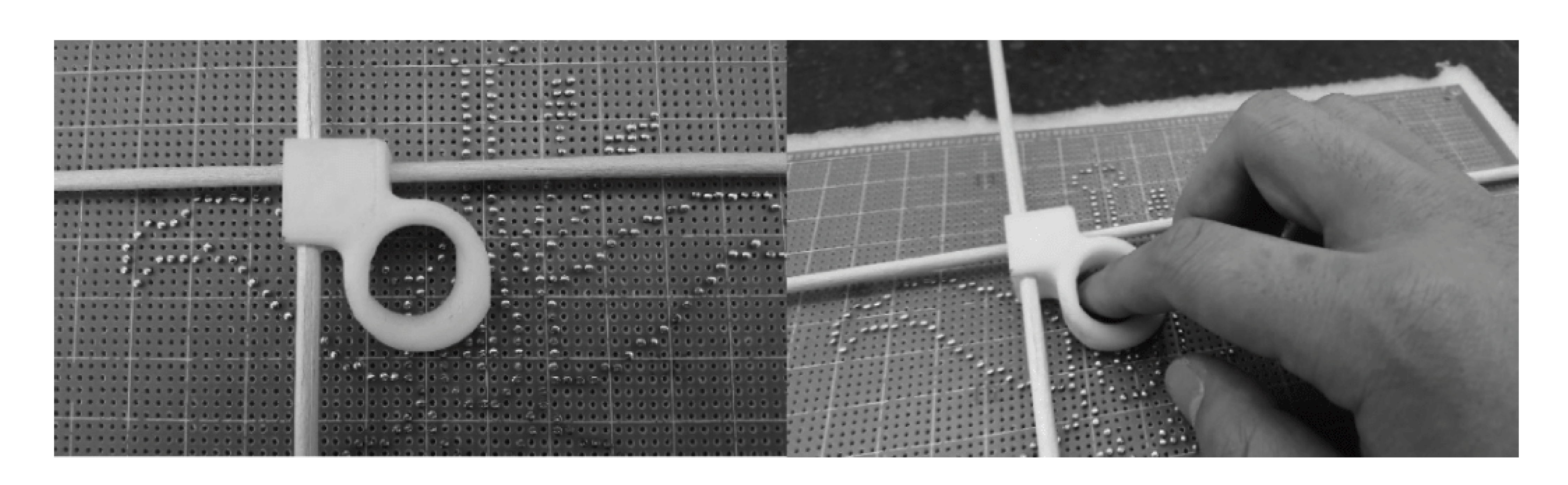


图 3.21　触摸引导系统(笔者设计和拍摄)

因为盲人将手放入时,任何生理上和心理上的不舒适都会显著影响图像的认知体验。课题组对此制作了多个版本的引导环,包括引导倾斜角、引导环直径、引导环形状等因素。在多轮次的用户体验尝试中,带有 45°倾斜角、直径 20mm 的圆形引导环拥有更好的引导体验。

3.7.3　实验 3.3:图像的主动/被动认知交互方式与触听觉多通道认知方式

通过以上两节多通道认知和主动/被动认知的设计和分析,课题组采用用户实验方式进行设计评价和设计改进,继而完成实验 3.3,即图像的主动/被动认知交互方式与触听觉多通道认知实验。

实验 3.3 中,变量为 2 个:是否引入听觉的语言描述,采用多通道认知(相对于仅采用触摸认知图像);以及是否引入触摸引导(相对于盲人主动触摸)。因此以上 2 个变量产生了 4 种情况,见表 3.8。

表 3.8　实验 3.3 中 4 种图像认知方式

	多通道	触摸引导	用户认知图像方式
方式 1	否	否	仅使用触觉,主动触摸认知图像
方式 2	否	是	仅使用触觉,触摸引导认知图像
方式 3	是	否	引入语言描述的触听觉认知图像
方式 4	是	是	引入语言描述的触听觉触摸引导认知图像

针对以上 4 种图像认知方式,每位盲人被试都需要使用,同时要避免被试在实验中的学习因素,因此,课题组准备了 8 幅触觉图像,每种认知方式验证 2 幅图。图 3.22 为实验 3.3 中的部分触觉图像。

以图 3.22 左下角的化学实验图举例,4 种理解图像的方式依次如下:

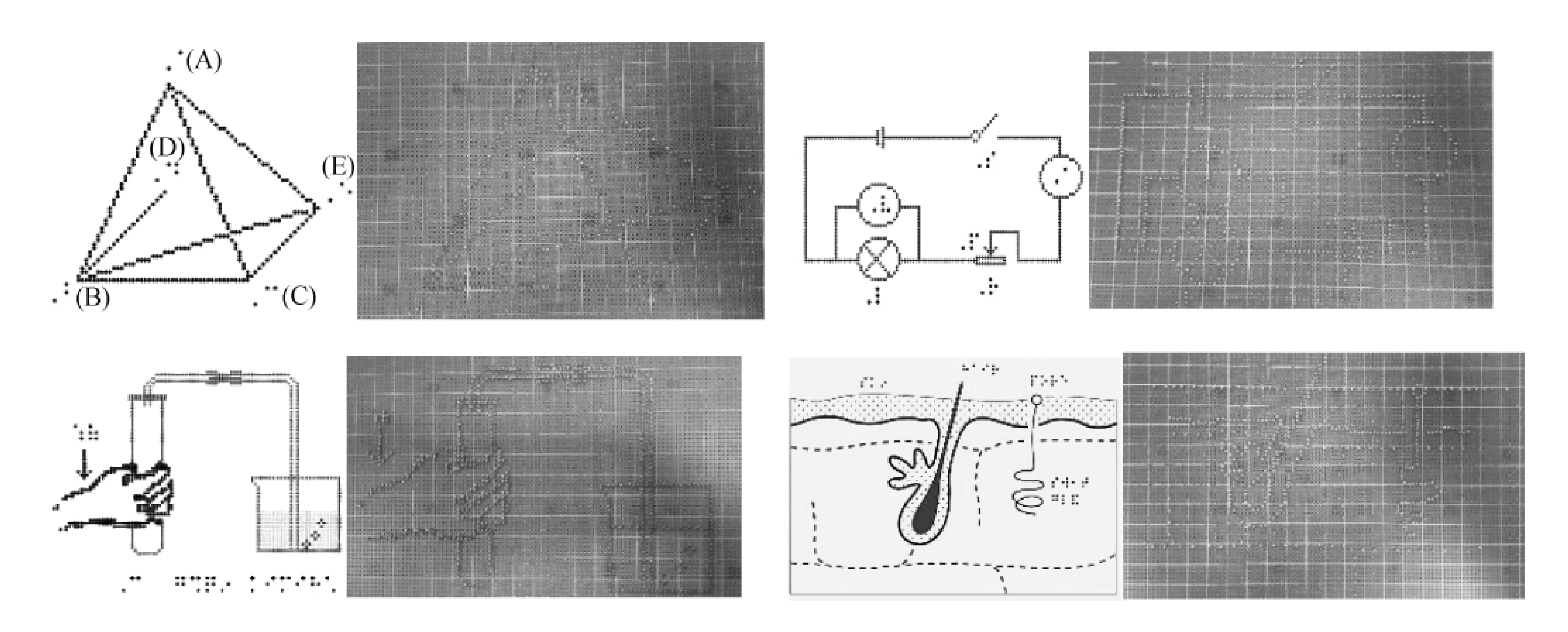


图 3.22　实验 3.3 中部分触觉图像举例

方式 1：将图像置于被试桌上，被试主动触摸。

方式 2：将图像置于被试桌上，被试使用触摸引导方式，沿着图 3.22 所示的方式，以手—试管—细管—烧杯—气泡的顺序依次沿着线条移动触摸。

方式 3：将图像置于被试桌上，同时开始语音讲解“这是一幅化学实验图，图中人手握试管，试管上部连着细管，细管插入装满水的烧杯中，细管口有气泡冒出”。

方式 4：将图像置于被试桌上，开始语音讲解“这是一幅化学实验图，图中人手握试管，试管上部连着细管，细管插入装满水的烧杯中，细管口有气泡冒出”。同时，被试使用触摸引导方式，沿着图 3.23 所示的方式，以手—试管—细管—烧杯—气泡的顺序依次沿着线条移动触摸。而且在任何时刻，触摸引导的位置都是语音讲解的位置，触觉与听觉保持内容同步。

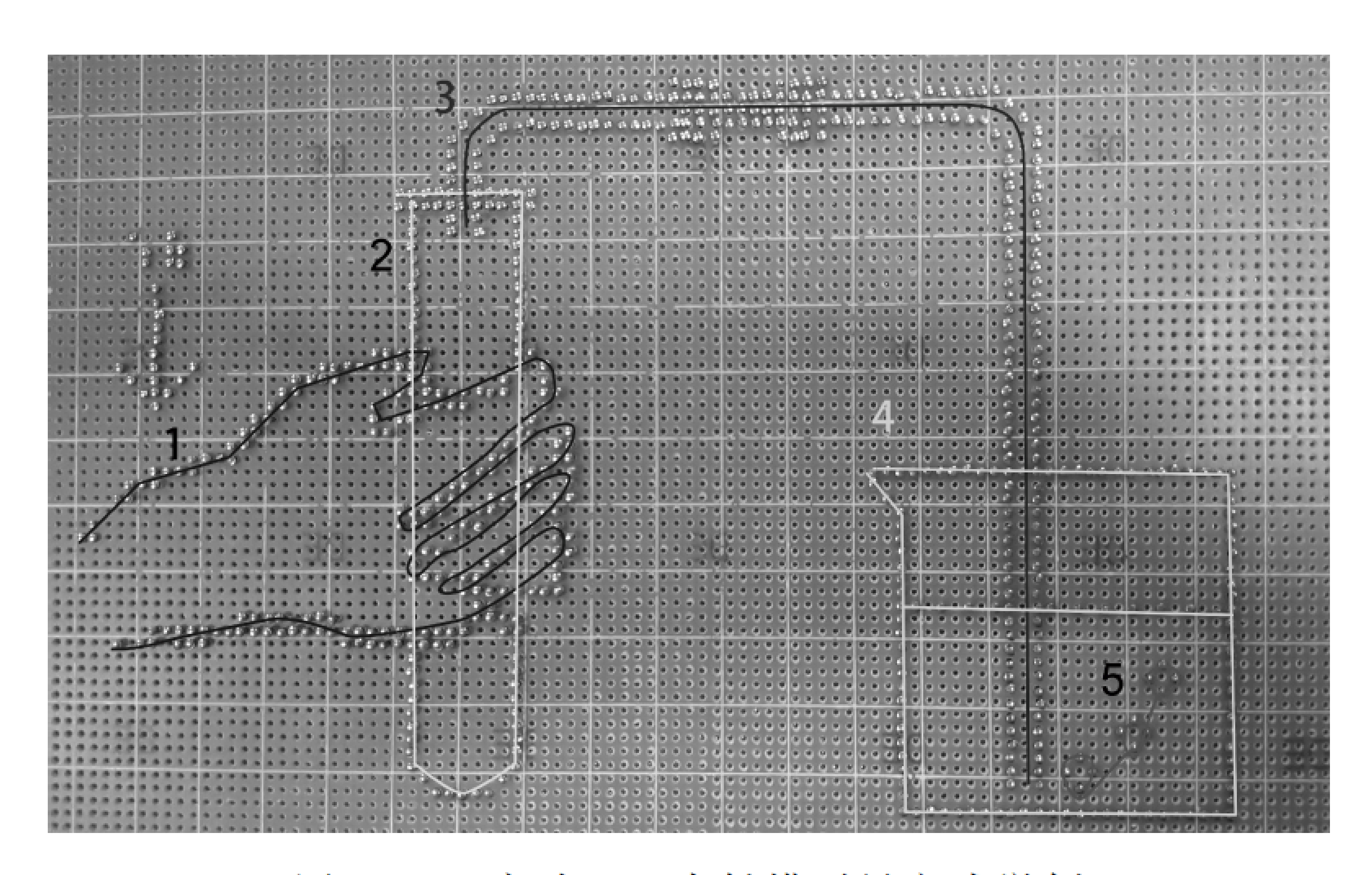


图 3.23　实验 3.3 中触摸引导方式举例

课题组邀请了全体 16 位被试(具体见 3.4 节)参与实验(见图 3.24),对所触摸的图像和采用的认知方式进行伪随机打乱。然后依次供被试触摸。每一幅图触摸时间为 2 分钟,包括采用触摸引导以及语言描述的时间。触摸完毕后,被试需要回答:

- 在本次实验之前,是否学习过类似内容的图像?需回答“是”或“否”;
- 这种理解图像的方式你认为在多大程度上帮助你对图像的理解?以 1～10 分评分,1 分为没有任何帮助,5 分为平均帮助,10 分为极大帮助;
- 这种理解图像的方式你认为在多大程度上让你感到舒适?以 1～10 分评分,1 分为极不舒适,5 分为平均,10 分为极舒适。

被试以伪随机顺序学习理解 8 幅触觉图像后,还需要以打乱的顺序再次触摸这 8 幅图像,并尽可能详尽地描述每幅图像的大意和细节,包括用语言描述和手指指向描述。实验者依据盲人学校相关老师制订的细节内容,给出盲人描述信息完整性的百分比数据。表 3.9 为被试实验流程记录的范例:

表 3.9 实验 3.3 被试实验流程记录范例

被试姓名,性别,年龄								
图像	认知方式 1	认知方式 2	认知方式 3	认知方式 4	先验知识	帮助性(分)	舒适性(分)	再认信息完整度(%)
图像 3		◊			是	1	10	10
图像 4	◊				否	2	9	20
图像 8			◊		是	3	8	30
图像 1				◊	否	4	7	40
图像 2			◊		是	5	6	50
图像 5				◊	否	7	4	60
图像 7		◊			是	9	2	80
图像 6	◊				否	10	1	100



图 3.24 实验 3.3

3.7.4　实验 3.3 的结果、分析与结论

按照既定实验方法，课题组做了 16 名被试实验。由于 16 名盲人的认知能力互有差异，因此本实验着重于分析不同的图像和不同的认知方式带来的差别。关于帮助性、舒适性和再认信息完整度的实验结果见表 3.10、表 3.11、表 3.12：

表 3.10　8 幅图像的帮助性统计数据

图像	方式 1 帮助性		方式 2 帮助性		方式 3 帮助性		方式 4 帮助性	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
图像 1	4.5	0.577	3	2.160	8.75	0.957	8	2.160
图像 2	5	0	2.25	1.258	8.25	1.708	7	2.449
图像 3	5.25	0.957	2.5	1.291	8.5	1.291	7.5	2.082
图像 4	4.25	0.5	3.75	2.754	8.25	0.957	9	0.816
图像 5	5	0	3.5	2.646	9.25	0.957	9.5	0.577
图像 6	5.5	0.577	2	1.414	9	0.816	8.25	1.708
图像 7	5.25	0.5	3.25	3.201	8.25	0.5	9.25	0.957
图像 8	4.75	0.5	2	0.816	8.25	0.957	9	0.816
平均	4.937	0.451	2.781	1.943	8.687	1.018	8.4375	1.446

表 3.11　8 幅图像的舒适性统计数据

图像	方式 1 舒适性		方式 2 舒适性		方式 3 舒适性		方式 4 舒适性	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
图像 1	5	0	2.25	1.5	9	0.816	7	1.826
图像 2	4.75	0.5	2.5	1.732	9.25	0.957	6.25	1.893
图像 3	5.25	0.957	2	0.816	8.75	0.957	7.75	2.630
图像 4	5	0	2.75	1.708	8.5	1.291	8.25	1.708
图像 5	5	0	3.75	1.5	8.75	0.957	7.25	1.708
图像 6	5.5	0.577	3.5	1.291	8	1.826	7.75	2.630
图像 7	4.75	0.5	3	1.414	8.25	0.957	9	1.155
图像 8	5	0	2.5	1.291	8.25	0.957	8.75	1.893
平均	5.031	0.317	2.781	1.406	8.594	1.090	7.75	1.930

表 3.12 8 幅图像的再认信息完整度统计数据

图像	方式 1 再认信息完整度(%)		方式 2 再认信息完整度(%)		方式 3 再认信息完整度(%)		方式 4 再认信息完整度(%)	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
图像 1	95	10	100	0	100	0	100	0
图像 2	90	11.547	90	11.547	95	10	95	10
图像 3	82.5	9.574	87.5	5	90	5.773	85	23.805
图像 4	67.5	33.040	72.5	26.300	80	21.602	90	18.257
图像 5	62.5	25	60	21.602	85	12.910	87.5	9.574
图像 6	42.5	29.861	50	35.590	80	8.165	82.5	12.583
图像 7	50	35.590	45	31.091	87.5	12.583	85	12.910
图像 8	20	24.495	25	20.817	82.5	9.574	87.5	9.574
平均	63.75	22.388	66.25	18.993	87.5	10.076	89.06	12.088

表 3.10 和表 3.11 表示了 4 种不同方式的帮助程度和舒适程度。方式 1 为最一般的触摸方式,两项的平均分均接近 5 分,也是盲人触摸图形的一般状态。方式 2 分数明显低于方式 1,经过统计计算,代入方式 1 和方式 2 的数据,配对 T 检验呈显著性(帮助性 $t=2.16>1.94$, $p=95\%$;舒适性 $t=3.12>1.94$, $p=95\%$)。因此,在仅通过触摸的条件下,触摸引导几乎没有带来帮助,反而造成了盲人用户一定程度的焦虑和不舒适。

方式 3 和方式 4 表示在引入语言描述的情况下,采用主动探索和触摸引导方式。方式 3 和方式 4 在帮助性和舒适性的分数上明显高于方式 1 和方式 2。经统计计算,方式 3 或方式 4 与方式 1 或方式 2 做配对 T 检验均呈显著性(以方式 3 对比方式 1 为例,帮助性 $t=6.27>1.94$, $p=95\%$)。因此语言描述能显著提高盲人对图像的理解认知能力。

将方式 3 和方式 4 进行对比,帮助性和舒适性上方式 4 略微低于方式 3。代入方式 3 与方式 4 的数据,配对 T 检验呈非显著性(帮助性 $t=0.27<1.94$, $p=95\%$,舒适性 $t=0.76<1.94$, $p=95\%$)。因此从该实验看,方式 3 与方式 4 在帮助性和舒适性上没有显著差异。

表 3.12 表示了盲人被试再认信息完整度。相对于"帮助性"和"舒适性"的主观打分,它反映了用户在客观上理解图形图像的能力。方式 1 和方式 2 数据相近,配对 T 检验呈非显著性($t=0.17<1.94$, $p=95\%$)。方式 3 和方式 4 数据相近,配对 T 检验也呈非显著性($t=0.19<1.94$, $p=95\%$)。

方式 3 和方式 4 在信息完整度上明显好于方式 1 和方式 2。方式 3 或方式 4 与方式 1 或方式 2 做配对 T 检验均呈显著性(以方式 2 和方式 4 为例比较，$t=2.02>1.94$，$p=95\%$)。因此该实验表明在客观上，触摸辅助没有显著影响盲人对图像的理解认知能力；语言描述则能显著提高盲人对图像的理解认知能力。

3.8　文献研究及设计建议的提出

本章通过实验 3.1、实验 3.2 和实验 3.3 共 3 个实验，从图像尺寸、图像呈现方式和图像理解和认知方式，多角度探索了盲人触摸图像的认知和理解效果。与前人的相关研究相比，本实验所得的数据和结论扩展了盲人触觉认知的知识体系，在一些方面印证了它们的结论，也有值得深入研究的具有争议性的部分。

针对主动触摸与被动触摸哪种方式效果更好的研究在学术上有较大分歧，Heller(1980)、Loomis(1985)和 Philips(1983)认为主动触摸更优秀；Bairstowand(1978)、Heller(1983)和 Vega-Bermudez(1991)认为主动触摸与被动触摸的效果没有区别；而 Magee(1980)、Heller(1984)和 Kennedy(1995)认为被动触摸效果好于主动触摸。对此，Barry Richardson 在 2000 年针对“被动触摸”的研究开发了 TDS 系统(the Tactile Display System)[①]，为主动与被动触摸提供了设备上的支撑。

该系统主要由一组二维平面机械滑台和一个手指套组成。用户可以将手指伸入指套中，既可以主动地移动手指，同时设备记录整个移动轨迹，也可以读取设备存储的移动轨迹，进行被动的移动。该设计主要为了消除主动触摸时没有手指套环绕的完全不同的触感体验，因此，变量仅控制为“主动”或“被动”。

此后，Barry 和 Mark Symmons 分别在 2005 年和 2007 年通过 TDS 设备和 Phantom[②] 力反馈设备，完成了二维平面三维实体的主动触摸和被动触摸的对比试验，探索了针对触觉图像和三维物体的触摸表现。在二维平面的表现上，主动与被动触摸的表现没有显著差别。但根据 Mark(2007)

① Barry Richardson，Mark Symmons，et al. The TDS：A New Device for Comparing Active and Passive-Guided Touch[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering，2000(8)：414-417.

② Phantom 设备是 Geomagic 公司的触觉力反馈设备，用户通过操作一个实体(比如笔型、球型实体)可以感觉虚拟的力反馈效果。

的实验，触摸简单图像（如一个大写字母或圣诞树、雨伞和心形等简单图形），被动触摸表现更好，触摸复杂图像（如多个大写字母）则是主动触摸更好。①

另外，Alexander 等人测试了单点方的盲文点显器，并用限制设备控制盲人用户被动地滑动阅读盲文。②

Alexander 的实验说明，被动的盲文阅读的正确率显著低于无限制的正常触摸，且"手不动，点显器动"的被动方式的认知正确率同样显著低于无限制的正常触摸。因此可以得出，通过被动引导的单点方显示设备影响了盲文阅读体验，同时用户的主动滑动和本体运动在盲文阅读的情境下提供了帮助。

实验 3.3 的部分结论印证了前人的分析，即主动探索与触摸引导在帮助性和舒适性上的差异呈非显著性。但是经过实验反思和实验时盲人被试的相关反应，我们发现主动探索和触摸引导的选用与触觉图像呈一定相关性，且实验结论与文献的实验结论不一致。

在实验 3.3 的过程中，盲人普遍表达的意愿是将主动触摸应用在相对简单的图像中，因为对于内容较少的图像盲人认为通过自己的主动触摸就可以理解，而针对曲线较多、内容复杂的图像，盲人认为难以通过自主的触摸理解。尤其在实验时，通过触摸引导的方式，盲人能更好掌握曲线的走向过程和图像的层次划分，按我们的设计，逐步地理解图像。

实验时，课题组发现选用的 8 幅触觉图像也体现了难易差别。图像 6～8 出自北美盲文机构中曲线较多、内容复杂的图像，盲人通过触摸引导对这些图像的曲线理解稍优于主动触摸（区别同样非显著）。笔者分析，触摸引导同时也带来了不舒适，抵消了一部分引导的积极效果。因此从触觉认知的设计上，如果将"被动的触摸引导"作为可额外选择的一种方式，使用户在充分主动触摸之后，再通过引导强化曲线和图像层次的理解，会更有利于图像的认知。

将本章的实验和文献研究总结，可以初步得出触觉图像认知的设计

① Mark A Symmons，Barry L. Richardson et al. Active vs passive touch：the state of play & the future[M]//Proceedings of Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems，Washington D C：IEEE Computer Society Press，2007.

② Alexander Russomanno，Sile O'Modhrain，et al. Refreshing Refreshable Braille Displays[J]. IEEE Transactions on Haptics，2015，8(3)：287-297.

建议：

- 点阵分辨率固定时(2.5mm)，增大触觉图像尺寸，放大图像细节；
- 充分利用盲人用户的触觉能力，包括手指的被动肤觉感知和手及上肢的本体运动感知能力，单纯的肤觉感知难以帮助盲人建立图像的整体理解；
- 在主动探索与触摸引导两种方式二选一时，触摸引导没有显著优势，但先主动、再引导的理解方式能结合二者优势，理解力更佳；
- 语音描述能显著提高盲人图像的理解能力，在很大程度上帮助提高盲人的触觉认知。

3.9 本章小结

本章深入讨论了当设计用户为盲人群体时的触觉认知及交互设计。笔者首先针对设计人群进行一定的用户研究，包括盲人的教育情况、目前生活情况和针对信息时代的个人看法，挖掘了为盲人用户做触觉设计的方向。而后文章提炼出一个重要的设计点，即盲人对图形图像的理解问题，并围绕此需求展开研究。

对此，本章先采用文献研究和产品调研等方式，梳理了从 1969 年的 TVSS 系统开始的，针对盲人触觉和图形图像相关的辅助设备，并深入分析它们的交互设计。但在互联网时代的今天，盲人上网读图的需求难以通过这些辅助设备得到满足，因此笔者从触觉图形图像认知的角度开展深入研究，即何种触觉图形图像的设计，以及何种触摸图像的认知及交互设计，更能帮助盲人用户理解。

实验 3.1 说明在恒定触觉分辨率情况下(2.5mm)，更大尺寸的触觉图像能容纳更多细节信息，盲人的触摸理解效果会更好；

实验 3.2 说明静态触觉图像的触摸效果远好于动态图像，原因在于人触觉系统中的手和四肢的本体感知和运动能力是不可缺少的；

实验 3.3 说明语音解释能显著提高盲人对图像的理解效果，主动探索与触摸引导在二选一的情况时，对图像的理解差别没有显著性。但通过实验观察和用户交流反馈，曲线较多、内容复杂的图像更适合使用触摸引导方式。

第4章 盲人触觉交互的用户体验

盲人朋友用手触摸学习时，产品的触摸体验，乃至人-机的触觉交互的体验都是非常重要的研究问题。和产品的功能性和可用性相比，用户体验更强调以用户为中心的、与产品接触的整个时间跨度的、用户情感或心理上的表现。好的用户体验是任何一款产品、一种交互方式、一种设计方法都要追求的目标。本章从用户体验的角度出发，先结合文献综述用户体验，再针对本书的“触觉”深入剖析触觉的体验。通过触觉体验特征的解析，本章着重分析针对盲人用户触觉体验的特征和影响因素，为盲人用户的触觉交互设计理论与方法提供指导。

4.1 用户体验概述

在《现代汉语词典》中，“体验”一词解释为：“通过实践来认识周围的事物；亲身经历。”“体验”的来源为德文“Erlebenis”，本义为“经验”“经历”“感受”等。狄尔泰认为体验需用“生命”来解释，并认为其德文词根是生命“Leben”，即体验是生命的体验，人们体验，所以存在。

体验作为“主体通过自身直接的活动认识和把握客体，并把对客体的认识纳入主体的身心之中，通过主体的内心体察而内化为主体体认、把握自身存在和外部世界的一种认识方式”[①]，也是人类一种基本的实践方式，在人的成长和发展中必然具有不可或缺的重要价值[②]。

而用户体验更偏向设计领域的范畴，指的是产品、交互或某种设计对象，经过设计，给予使用或关联的用户的感觉。用户体验的三个基本特征是：有用户的参与；用户与产品、系统或者有界面的任何物体进行交互；用户所关注的问题是可观察的或可测量的。[③]

---

① 庄穆. 体验的认识功能初探[J]. 福建学刊，1994，6：51-53.

② 闫守轩. 体验与体验教学[J]. 教育科学，2004(12)：32-33.

③ 特里斯，阿伯特. 用户体验度量：收集、分析与呈现[M]. 周荣刚，秦宪刚，译. 2版. 北京：电子工业出版社，2016.

在设计学科中,用户体验在近年来越来越被看重。虽然用户体验的感受主体是用户,具有较强的个体主观性,但对于群体消费者来说,根据群体的社会属性和特点,用户体验则具有一定的共性,因此可以引入设计来实现。

用户体验作为一种描述用户行为的长期的过程,也具有分层次的需求。人本主义科学家马斯洛提出著名的五个层次的需求:“生理需求、安全需求、社交需求、尊重需求和自我实现需求。”①而针对用户体验,用户也有针对某件产品的用户体验的需求。陈为将用户体验的需求定义为以下六层:“产品实用功能需求、产品感觉需求、产品交互需求、产品情感需求、产品社会需求和产品自我需求”。② 图 4.1 描述了此用户体验的六个需求层次和相关要素:

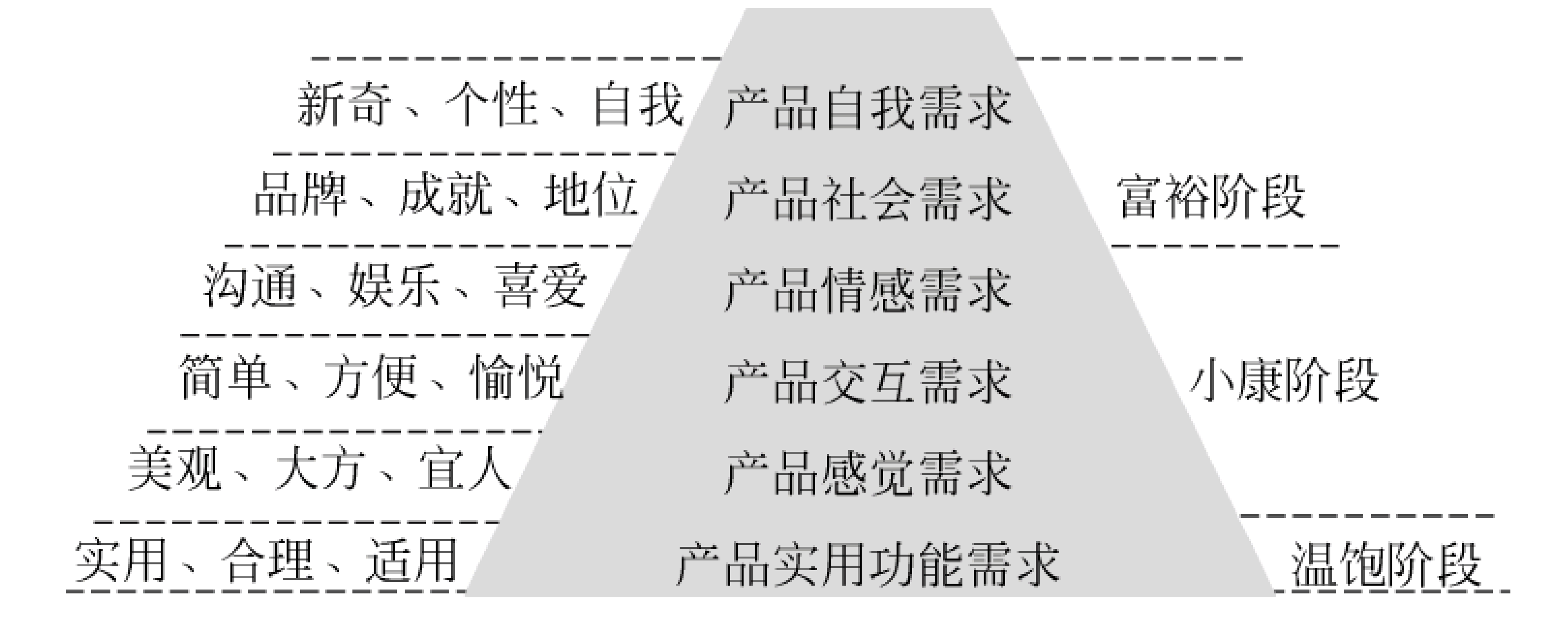


图 4.1 用户体验设计的六个需求层次和相关要素③

图 4.1 揭示了用户体验的整体性。一件产品从其最基础的功能性、可用性,到有效性、易用性,再到情感上的依赖性和用户的自我满足性,都涵盖在产品的用户体验的范畴中。

笔者认为,图 4.1 所述的六个层次,前两个层次即为功能性和可用性的描述。它是一个产品最基本的要求和属性,从 20 世纪中叶的工业设计时代开始,设计师和用户就开始注重一件经过设计的产品的功能。功能性也是用户体验的基础,对于功能上缺失的产品,用户体验自然无从谈起。但在当今信息时代,只谈功能性的设计是远远不够的。

第三层产品交互需求可以理解为产品的有效性和易用性。它需要在功能性满足的前提下,针对用户与产品的交互和使用进行设计,提升性能,简化操作,使用户不仅仅认为“能用”,而且还要感觉“好用”。

---

① Maslow. A theory of human motivation[J]. Psychological Review, 1943: 370-396.

②③ 陈为. 用户体验设计要素及其在产品设计中的应用[J]. 包装工程,2011,32(10):26-30.

后三层的需求则上升到了用户的情感和所在的社会环境，这也是用户体验在目前的设计领域中最多被研究和看重的特点。用户对产品的期待，不局限于产品的功能与可用性，独特的使用体验以及与用户心理所产生的共鸣成了追求的目标，用户希望能与产品之间进行多方位的温馨的情感性的交流。① "未来的产品，必须取悦用户的心，而不是大脑。"②因此，设计者需要通过产品的每个细节"设计用户的情感"，并确保用户在你的产品上的所有体验不会发生在你"明确的、有意识的意图"之外。要考虑到用户有可能采取的每一个行动的每一种可能性，并且去理解在这个过程的每一个步骤中用户的期望值。③

而针对"用户在情感上满足需求"的要求，Jesse James Garrett 在《用户体验要素》一书中阐述了用户体验设计工作的分解：战略层、范围层、结构层、框架层和表现层④，五个层面自下而上建设，如图 4.2 所示。

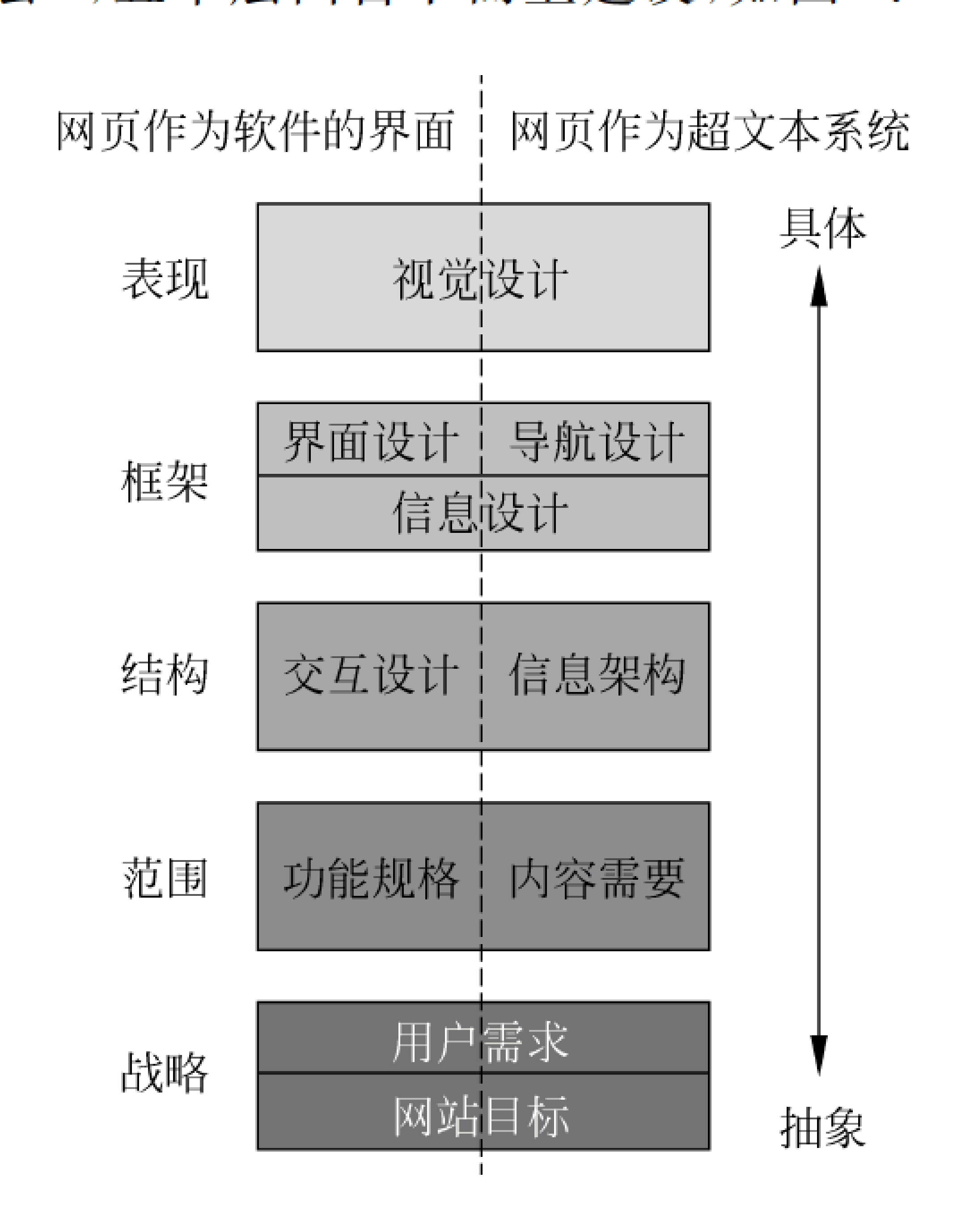


图 4.2　用户体验设计的各个组成要素⑤

①③　黄晟．基于用户体验的 APP 设计研究[D]．西安：陕西科技大学，2012.

②　郭南初，熊志勇．产品形态仿生设计与逆向工程技术[J]．包装工程，2006，27(10)：218-219.

④⑤　加瑞特 J J．用户体验要素：以用户为中心的产品设计[M]．范晓燕，译．2 版．北京：机械工业出版社，2014：4-17.

Jesse James Garrett 的研究思路是从产品的概念和战略开始入手，针对用户的真实需求或网站目标，制订其功能和内容，再进行交互、架构，以及界面、导航等设计，最后通过视觉设计，呈现给最终用户，并在每一阶段都以完整的用户体验为设计中心，使之贯穿于整个产品的设计与创新过程中。这种用户体验设计方法秉承了由抽象到具体、由大方向到小细节、由底层到顶层的设计思路。

在产品的使用周期中，用户体验覆盖了非常广泛的时间跨度。产品使用前的准备期、产品使用中的交互期以及使用后的反馈期都包含在用户体验的范畴内。产品使用交互的阶段是用户体验的基本，但在使用前和使用后的阶段，基于产品在社会上的口碑、流传度、认可度等，也构成了影响用户体验的重要因素。

用户体验在商品经济、商品社会中同样发挥着重要的作用。约瑟夫·派恩(Joseph Pine Ⅱ)和吉尔摩(James H. Gilmore)在《哈佛商业周刊》提出了著名的"体验经济理论"，将狭义的用户体验设计外延到"体验经济"，即企业以服务为中心，以商品为素材，为消费者创造值得回忆的感受的一种经济形态。"体验经济理论"区分了经济价值演进的四个阶段：产品(commodities)经济、商品(merchandise)经济、服务(server)经济和体验(experiences)经济。清华大学美术学院蔡军教授对此有如下的类比和分析，见表 4.1。

表 4.1 体验经济理论案例分析(蔡军)

产品经济	商品经济	服务经济	体验经济
咖啡豆	咖啡	咖啡	咖啡
售价：＄1/磅	售价：＄1/杯	售价：＄2～5/杯	售价：＄15/杯
期货市场	街头咖啡店	五星级酒店	威尼斯圣马可广场 Café Florian

表 4.1 以咖啡为例，展示了四种经济方式的联系和差别。随着工业化和信息化进程的发展，产品的功能性本身已经远达不到商品社会中用户的需求了，其附加值也是最低的。而本例中体验经济的经济行为说明商品需凝结越来越多提升用户体验的功能，比如"威尼斯圣马可广场 Café Florian"的位置、装潢、文化、风俗等非咖啡产品的因素。可以说，销售产品就是在销售体验。

4.2 触觉体验

针对本课题，在触觉的认知和交互设计中，用户体验同样是影响设计的关键因素。基于上节对用户体验的综述分析，本节分析何谓触觉体验、触觉体验的特殊性以及触觉体验的本质。

4.2.1 何谓触觉体验

触觉体验为用户在使用触觉过程中所感受的体验。狭义地讲，它可以指针对某个产品或某个行为的触觉的感受和体验。而广义地说，触觉体验指触觉通道带给用户的体验，可以不限定使用触觉针对的对象。

因为触觉是人作为动物的最本能的感觉，触觉体验伴随着触觉长期存在着。在信息技术到来之前，触觉体验基本停留在人们的日常生活和工具使用上，工具的设计开发人员兼顾了触觉体验的设计和实现。但随着计算机的出现和普及，人机交互的方式越来越需要触觉的引入，随着 21 世纪虚拟现实/增强现实相关技术的飞速发展，触觉正在被越来越多地研究，触觉的体验也在人机交互体验领域占据着极其重要的地位。

比如计算机普及以来，人机交互最主要的输出设备——键盘鼠标的设计和开发，离不开触觉体验的研究。在鼠标的设计上，由于用户需要用手握持，它的表面形状直接关系到了握持的触觉体验，因此许多厂商推出了不仅外观漂亮，表面形状还非常符合人体工学的设计。键盘的设计更是如此，用户用双手打字时整个键盘的尺寸，用手指敲击键帽时键帽给予的触觉反馈等都归于触觉体验的范畴。虚拟键盘的打字速度显著慢于实体键盘的例子[①]就很好地说明，触觉体验与生产效率是紧密联系的。

4.2.2 触觉体验的特征

由于触觉感官的特殊性，触觉体验相对于视觉体验、听觉体验等其他感官带来的体验，也有其独有的特点。尤其在当今信息时代，虚拟的数字信息

① Patrick Armstrong, Brett Wilkinson. Text entry of physical and virtual keyboards on tablets and the user perception[C]//Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction OzCHI. 2016: 401-405.

多以视觉显示器和声音的方式通过视觉和听觉呈现，同时实体交互界面方兴未艾，用户和设计师更加注重虚拟信息和实体信息的有效结合，从而赐予了触觉体验研究独特的机会与平台。本节剖析相对于其他体验，触觉体验的特征。

（1）体验媒介：人体触觉系统

用户通过人的触觉系统获取知识与体验，是触觉体验的定义来源，也是基本特征。值得注意的是，触觉是人体感官中唯一既包含输入又包含输出的，即人体的肤觉、本体运动感觉和人对实体的控制、操作。

另外，用户基于以往的触觉经验和知识，通过其他感官获取的信息也可以获取相应的触觉体验，比如 2.2.2 节“触觉情感的多感官传达”，用户通过视觉、听觉等其他感官也能得到触觉相关的情感体验。

这种体验的方式是基于人体的触觉系统的，得益于用户以往的触觉经验和知识。用户通过其他感官获取信息后，大脑将触觉与其他感官所获取的信息进行整合、认知与加工。这种触觉体验也涉及人体触觉系统，因此从触觉体验的媒介特征上看，涉及触觉系统的体验，无论是否涉及其他感官，都涵盖在触觉体验的范畴内。

（2）体验对象：（承载着数字信息的）实体

在体验对象上，首先，触觉体验更多地针对可被触摸的实体。实体的形状、材质、纹理、温度等物理信息组成了体验对象。这些信息可以是恒定的，以静态的实体形式出现在用户的物理环境中。但随着实体交互界面的发展和相关技术的成熟，越来越多的虚拟数字信息转为实体的形式，出现在用户面前。因此，承载着数字信息的实体成为体验的重点对象。

与传统的静态实体相区别的是，承载数字信息的实体的一大特点是动态的、时变的，以此在有限的实体区域内表达无尽的数字信息。

（3）体验需求：功能性、实体稳定性、安全性

与广泛使用的视觉图像用户界面相比，通过触觉的交互方式学习和理解虚拟的数字信息还未达到成熟和广泛使用的阶段，因此目前触觉体验的第一需求是功能性。

功能性是任何产品或体验的根本，没有功能就谈不上体验。一般的触觉设备通过用户的运动操作和触摸，使用户的触觉感觉与物理空间的位置建立某种映射关系，从而提供相应的功能。比如用户操作鼠标时，手部的运动和按键信息传递到虚拟世界中，并在屏幕上呈现反馈信息。再比如赛车

游戏中的力反馈方向盘，手在握持转动方向盘时，会感受到系统模拟赛车行驶时产生的震动，并给予用户实时的反馈。

另外，实体作为体验对象，给予了触觉体验的实体稳定性。[①] 它由物理实体的特质衍生而来。相比于显示器、音响等视听觉输出设备，实体对用户是“看得见、摸得着”的，在通过触觉感受和体验时，会带给用户一种物理的、实体的、稳定的感觉。

与此同时，实体稳定性会作用于用户的情感层面，上升为触觉体验的安全性。安全性代表用户与设备之间建立了信任的空间，从而能更有效地使用。安全性是任何操作与交互都普遍存在的需求，但是通过触觉的体验能更好地满足。因为人的日常生活是发生在物理空间的，是用户最熟知、最信任的空间。将虚拟信息迁移至物理空间，并以实体的方式承载，更有利于建立信任的桥梁，从而提供安全性。

（4）体验生成：触觉赋予了更强的体验感和沉浸感

触觉体验在体验生成方面赋予了更强的体验感和沉浸感。如今虚拟现实和增强现实正在开启商业化的浪潮，多种简易的（比如虚拟现实设备只是两片透镜和外壳，借助智能手机提供显示）、复杂的（比如 Oculus、PSVR、HTC Vive 等虚拟显示系统）虚拟现实设备和系统相继推出。但其中大部分设备只利用眼镜或头盔，营造单纯视觉方面的沉浸感。用户在沉浸式的视觉体验时，始终感觉到自己还是在家/办公室等环境中。其问题就在于这样的系统没有充分利用触觉的感觉和体验。

人体触觉系统中，皮肤感觉和本体运动感觉可以显著提升体验和沉浸感。比如过山车的体验包括视觉上的画面运动和飞翔，更包括加速度的频繁变化和迎面吹来的风，而后者需依靠人的触觉系统提供体验。图 4.3 是一个引入触觉感觉的虚拟现实体验案例，用户在观看沉浸式影片时，系统会根据视觉内容振动或摇晃座椅，用户就能在触觉方面与视觉内容相匹配，从而达到更拟真的效果。

在这个追求体验感和沉浸感的时代，视觉的沉浸感由于设备较小，实现起来相对容易。但要在体感上更上一层楼，触觉体验是不可缺少的。因此在体验的生成上，触觉体验拥有更强的体验感和沉浸感。

---

① 黄晟. 基于用户体验的 APP 设计研究[D]. 西安：陕西科技大学，2012.



图 4.3　引入触觉感觉的虚拟现实体验

4.2.3　触觉体验的本质

通过体验的总数和触觉体验的特征分析，笔者下一步试图探究触觉体验的本质。体验本质的剖析可以从体验的自然性、社会性和建构性三个方面入手[①]，因此本书以触觉体验的角度，从这三个方面分别解析。

(1) 触觉体验的自然性

触觉作为人的一种基础感觉，是生而就有的。人在孩提时期就会自然地用手完成一些操作，控制身体进行某种动作。接着，人在物理环境中生活成长，周围的物理环境对人来说是再自然不过的。因此面对静态的实体，用户会很自然地触摸和操作。当将虚拟信息承载于实体时，由于用户界面端依然是实体，相比于其他交互界面，用户会更容易建立实体与虚拟数字信息的联系，从而理解到蕴含于实体下的数字信息。相比于其他体验，这种触觉的体验更具自然性。

① 张烈. 以虚拟体验为导向的信息设计方法研究[D]. 北京：清华大学. 2008.

触觉体验具有自然性有两重含义，第一，它需要相对较少的学习成本，用户可以相对自然地上手。第二，由于触觉操作相对自然，触觉的体验在默认状态下是趋同的。比如在跨社会、跨文化的背景下，生活中触觉的操作和体验在大多数情况下是一致的。比如开关的设计、按键的设计、实体的质感带来的感觉等触觉操作及体验的细节，在跨社会背景下是趋同的。

（2）触觉体验的社会性

触觉体验又有社会性。接上文所述，在跨社会、跨文化背景下，触觉的体验在某些方面依然受所处社会的影响。某些触觉方面，身体的手势、动作在不同社会和文化语义下，意思是截然不同的，比如“点头”与“摇头”的身体动作在某些国家代表的意义是相反的。

（3）触觉体验的建构性

触觉体验还有建构性。虽然触觉是基础的、天生的，但体验是一种主观的描述表达方式，因此触觉体验又与后天的个人环境和主观意愿相关，是逐渐建构的。比如用户在材质的触感、按键的软硬等方面都有个人的偏好，那么他们的触觉体验也是个人的、主观的。而这样的体验源于个人的后天环境，因此触觉体验具有建构性。

4.3　盲人用户触觉交互体验的特征和影响因素

上文体验和触觉体验的剖析为本研究课题提供了理论基础和支撑。那么，盲人用户这一特定群体在交互过程中的触觉体验具有哪些特征？以触觉图像为例，盲人群体在认知和操作触觉图像时，哪些因素影响着交互过程中的触觉体验？本节试图给出回答。

4.3.1　从盲人的触觉认知到交互体验

3.3 节～3.8 节研究了盲人的触觉认知能力、效果，以及通过辅助和设计方式提高认知能力。事实上，盲人触觉认知是触觉交互中非常重要的部分。在这里，“交互”涵盖盲人用户与产品设备之间双向的交流，包括盲人以触觉的方式对信息的认知和理解，以及以触觉的方式进行操控和输出。

对于一般用户，视觉是数字信息认知的最有效的方式，有数字信息呈现的地方，基本就有诸如电脑或手机的显示屏。但对于视力缺失的盲人用户，触觉和听觉必须承担大量的认知工作。因此本书试图探索采用触觉通道进行认知的可行性。并且，盲人触觉交互的目的之一是提高盲人对数字信息

的认知能力，会采取一些辅助方式，因此触觉交互的研究包括认知的部分，以及针对认知的效果，对设备做出的反馈和操作。在交互过程中，认知既是主体，也是目的。图 4.4 表示了触觉交互、触觉认知和触觉反馈操作的关系。

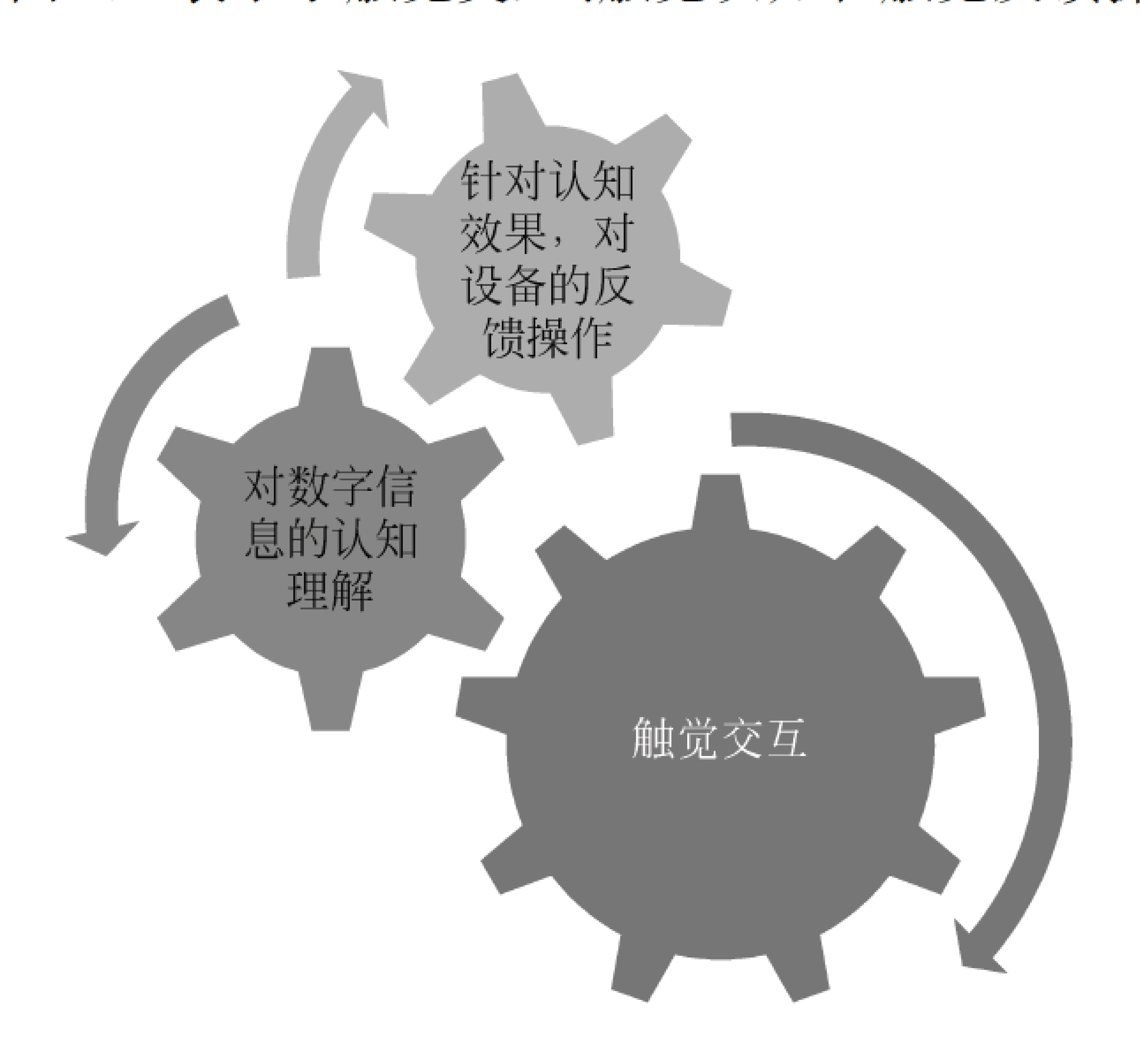


图 4.4　触觉交互、触觉认知和触觉反馈操作的关系

在体验层面，触觉交互体验包括认知过程的体验和触觉反馈操作的体验，而且体验更注重盲人用户长期的认知和交互过程，以及盲人的主观感受。因此笔者从以下几个方面研究触觉交互体验的特征和影响因素。

4.3.2　皮肤感觉与本体运动知觉

人体触觉系统的输入部分包括皮肤感觉和本体的运动知觉。实验 3.2 表明：如果搁置本体运动知觉，单纯的皮肤感觉会显著降低对触觉图像的认知能力；而同时调动肤觉和本体运动知觉则是目前盲人对触觉图像基础的认知方式，比如目前盲人主要使用的对图像的主动触摸和探索。

在输出和控制阶段，这两种感觉同样是紧密联系的，因为不管是按压、按键，还是旋钮、手势等操作，都需用到肌肉运动和触碰到设备后的皮肤感觉确认。因此盲人的皮肤感觉与本体运动知觉需同时引入，相辅相成，才能构造良好的触觉交互体验。

4.3.3　力的输出与力反馈量度

心理物理学的研究结论表明，人体皮肤对力的大小的感受量度是有限的。经验性的实验得出，人对外界的力的输入感受和输出控制量度最多为

4～5 个。它的意思是，将输入或输出的力的大小分为若干个等级，然后对于给定等级的输入或输出的力，输入感受方面，用户需要通过感受力的大小，推知力的等级；输出控制方面，用户需要根据力的等级，产生出等级匹配大小的力。

从经验性的实验分析，力的输入输出量度是由人体的触觉感受器和触觉系统决定的。用户在触觉交互操作时，如果分配了过多的量度，接近了人的感受极限甚至超出了极限，用户就会难以分辨力的大小等级，产生焦虑感等负面情绪，从而影响交互的功能性和有效性，显著影响触觉交互的体验。

事实上，目前在触觉按压和交互方面，比较完善的市场化案例基本只涉及 2 个量度的力。比如美国苹果公司推出的 iPhone 7 智能手机，手机中内置了“Taptic”触觉引擎，可以识别用户按压屏幕及 home 键的力量，并能够给予特殊的震动反馈，实现“3D touch”功能。

用户在操作时，可以轻触屏幕用于选中，也可以用力按压屏幕，用于更多的快捷操作。这两种力的操作使用户能够轻易辨别，并舒适地进行交互操作和反馈，从而营造良好的触觉交互体验。

目前很多盲人用户在使用 iPhone 智能手机，多个力的等级的按压交互对他们依然适用。所以作为设计师，基于人的触觉系统的特点和限制，进行符合触觉生理的设计，才能保证盲人触觉交互的用户体验。

4.3.4　触觉认知窗口

盲人触觉生理的另一特点是双手作为认知的主要渠道，双手的触觉识别区域的面积，即认知的窗口相对有限，尤其相比明眼人的视觉窗口，从识别面积和识别速度上都有很大差距。

因此，盲人在试图触摸认知和理解时，对认知窗口所覆盖的面积，以及需认知的实体的面积比较敏感。如果待认知实体的尺寸与用户的手部面积相对匹配，盲人可以较舒适地完成认知理解，增加积极正向的情绪，提升用户体验。但如果触觉实体或触觉图像尺寸过大或过小，触觉认知窗口的局限性缺点在用户体验上就会被放大。比如过小尺寸的触觉图像令盲人难以触觉到图像局部细节，自然影响整体的认知把握，而针对过大的实体，比如大型雕塑等，盲人张开双臂也只能摸到实体的一部分，无法有效理解全局。因此，盲人触觉认知窗口的特性显著影响着整体的触觉交互体验。

4.3.5　触觉的主动/被动认知

前文实验 3.3 探索了针对触觉图像，盲人用户在主动探索或触摸引导

方式下的认知效果和认知体验，实验结论为两种方式在认知效果上没有显著差异；不同复杂度的图像可能会对应更佳的认知方式。

从盲人的触觉交互和用户体验上分析，触觉的主动和被动触摸的方式有显著的体验差异。因为根据现今的盲人学习教育，触觉图像的主要学习方式是主动探索，并在条件允许的情况下加入语音的讲解。这种体验是盲人用户所熟知的。而被动的触摸引导设计是相对新奇的体验，但同时也是缺乏有效学习和适应的体验。

考虑到触摸引导所需的机械运动装置，它也许不能在任何主动触摸的情境下为盲人用户提供被动引导的第二选择。因此，对于触摸引导的设计就要非常谨慎，而且它显著影响着盲人触觉交互的用户体验。

4.3.6 多通道认知

实验 3.3 还研究了引入听觉的语言描述对盲人理解触觉图像的帮助。实验结论说明盲人用户在抽象的语言描述帮助下，对触觉图像的认知理解能力显著提高，并且在体验的“舒适度”量度上也有显著的优势。这是因为在本实验中，盲人用户的目的是图像的认知和理解，盲人所做的触觉的探索和交互都是围绕这个目的展开的。当外界环境为盲人用户达到目的又提供了一条更宽的道路时，更快速准确地完成认知必然会提升这一过程的体验。

触觉交互更偏向具象的体验，听觉交互侧重语言上抽象的理解。在互联网时代，触听觉两种交互方式结合运用，相互辅助，以多通道完成交互，方能满足盲人用户获取信息的需求。本书提出了一种盲人触听觉多通道交互模型，以多媒体信息传递和理解的有效性为目标，分成了不同层次。该模型见图 4.5。

盲人用户通过触听觉多通道交互，共有物理世界、交互界面、信息流和计算端四个层面参与。在物理世界，用户与环境因素参与交互。交互界面列举了目前盲人的主要交互通道，并归类为触觉界面、听觉界面、环境感知和环境控制，承载交互信息。信息流将信息的具象/抽象和输入/输出进行了拆分。其中抽象信息包括语音指令、语音回答和自然语言对话，即通过有效语义以抽象形式传输的信息。具象信息包括触摸控制、触摸感知和一般声音，即以实体形式和实体环境传输的信息。以上信息流再通过输入端和输出端的整合，在计算设备端进行处理。

将盲人的触听觉认知能力与此交互模型结合分析，我们可以得到，盲人用户的触听觉抽象信息处理和具象信息处理可以并行进行。从认知能力上看，不同通道的信息占用不同的脑力资源；从交互界面上看，触觉和听觉信

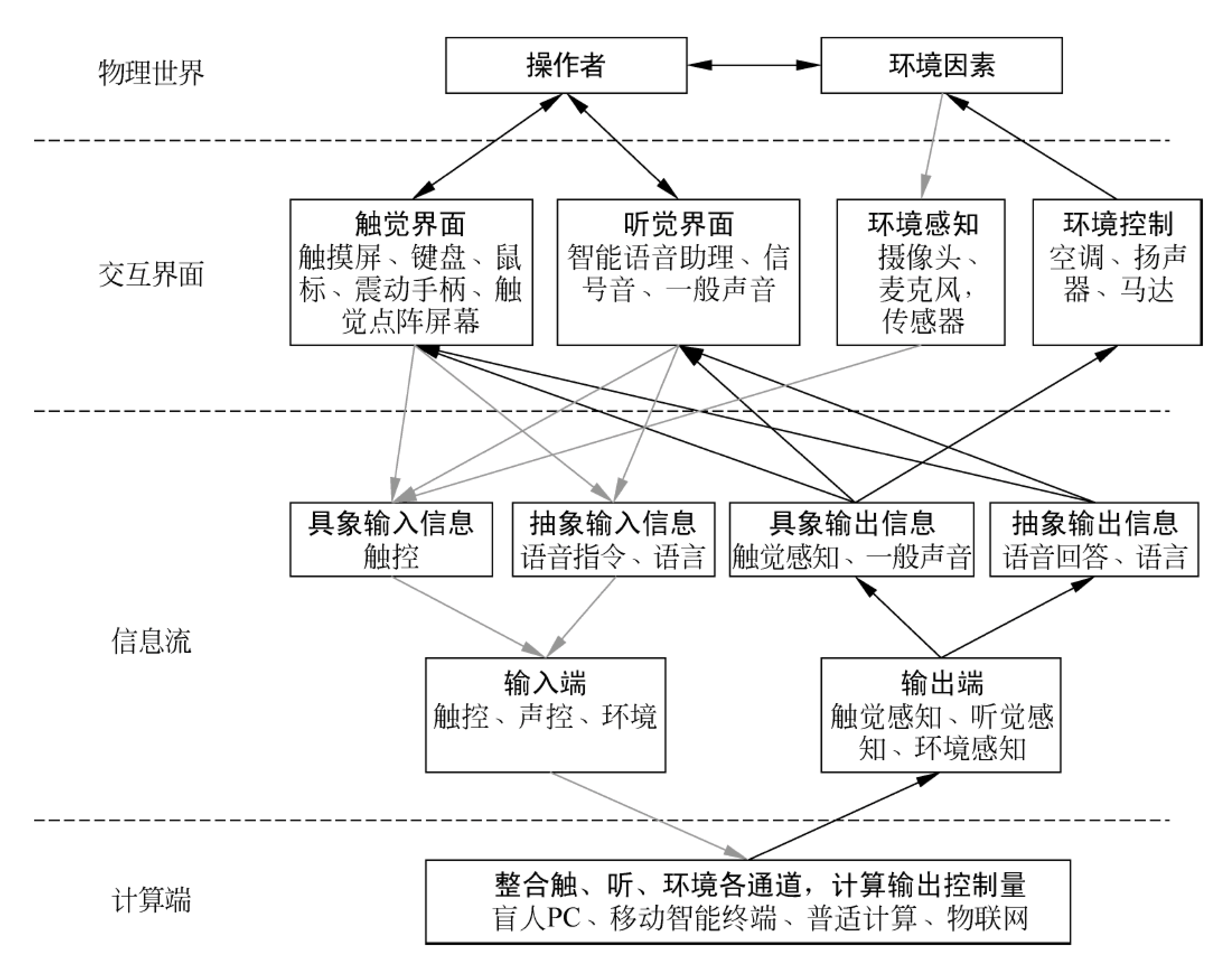


图 4.5　盲人触听觉多通道交互模型

息分别占用不同的传输空间，且没有相互干扰。因此在实际交互过程中，抽象的语音沟通与具象的触觉界面或一般声音共同作用，互为辅助，能承载更多信息，是更有效的交互方式。

在体验细节上，考虑到多通道一致性，语言描述需匹配用户正在触摸的区域，否则会造成触听觉的相互影响。而语音的匹配在技术和实现上又需要更细化的设计，才能保证触觉交互的用户体验。

4.4　本章小结

本章围绕着体验，从用户体验的概述，到针对触觉的用户体验剖析，再到在本研究课题的语境下，面向盲人用户的触觉交互体验研究。本章总结了多方面的影响触觉交互体验的因素，为触觉交互体验设计提供了设计理论和设计导向，进而支撑了触觉交互体验的设计方法论的体系。

第 5 章　基于盲人用户体验的触觉交互设计理论与方法

在交互界面和信息技术飞速发展的今天，人们获取知识的方式和交互界面技术的发展必将导致信息设计的根本性变革，同时相关的设计原则与方法论也需迭代与补充。

本书关注在互联网时代下，盲人用户的触觉认知及交互体验设计。针对盲人群体渴望与正常人一样无障碍地访问互联网，无障碍地获取信息的设计需求，本书试图提出基于盲人用户体验的触觉交互设计理论与方法，以前文的触觉及盲人触觉认知研究为基础，通过设计原则、设计目标、设计要素和具体的设计方法，构建一套相对完整的设计体系，并为触觉交互设计实践——面向盲人的触觉图形显示器设计开发提供理论依据，如图 5.1 所示。

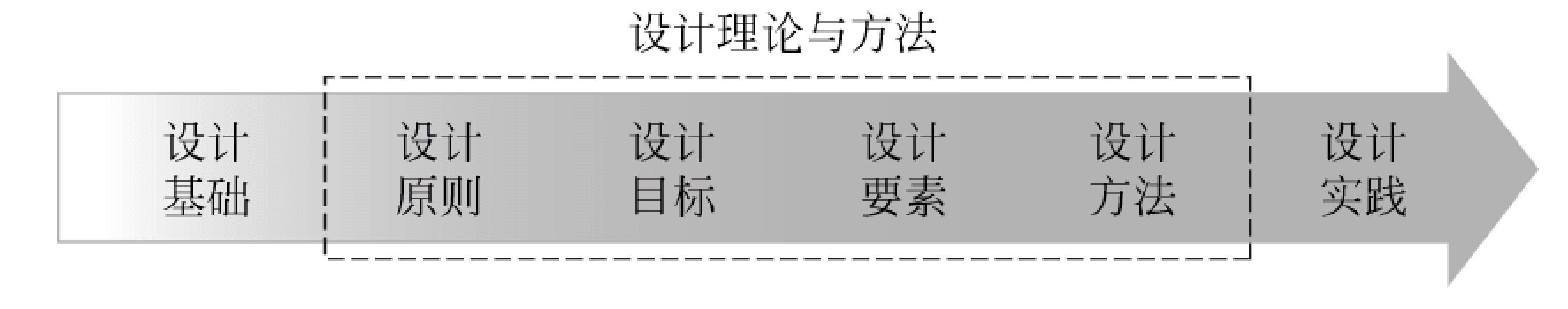


图 5.1　设计理论与方法

5.1　设 计 原 则

设计原则是整个设计体系作为纲领性的指导思想，设计师在每一步的设计工作时都需要考虑与借鉴。设计原则来源于第 2～4 章对盲人的触觉、触觉认知和交互体验的系统分析。笔者以盲人的触觉交互体验的角度，结合设计思维，试图给出以下设计原则。

5.1.1　符合盲人用户的具身认知

具身认知（embodied cognition）是认知心理学的重要观念，李恒威和盛晓明将其译为“认知的具身化”[①]。具身认知是指人对自己的身体情况和特

① 李恒威，盛晓明．认知的具身化[J]．科学学研究，2006(2)：184-189.

点、所处的物理环境等内在和外在的信息，形成对世界的经验性的、长期的认识和理解。

刘晓力提出："认知是具身的，意味着认知是从身体与环境的作用中产生。认知依赖于某种类型的经验，它们来自具有特殊的感觉运动能力的身体，这些能力与形成记忆、情感、语言和生命的其他方面的基础不可分割地联系在一起。这种观念与把心灵看作一台只涉及支配能够恰当表征世界的符号规则和程序的机械装置的、占统治地位的认知观念完全相左。"[①]因此，我们的经验、行为和体验都依赖于我们以往对自己和对外在世界的认知，内在和外在的联系异常紧密。

而我们对自己和对外在世界的认知，从个体和生物角度说，是基于人体的感官系统和大脑中枢的。我们日常所看、所听、所触、所感，逐渐构成了我们的具身认知，人作为个体十分依靠自己的感觉，来进行对自身、对外在的认知。

因此，当有一类人，他们最基础的感官系统与一般人有明显差异时，具身认知的建立基础就有差异，从而导致具身认知的显著差异。盲人用户同样拥有对世界的理解的根源[②]，也就是其对身体、动作和周围空间的意识构成了最深层、最基本的认知能力。而失去视觉通道会对这样的认知能力造成多少区别于一般人的差异，这是目前脑科学、认知心理学、生理学研究的难题。

从设计的角度来说，也许无法得到这种差异的定量数据，因此需要以经验性的、深入访谈式的设计方法逐步探索盲人用户的具身认知，并给出符合其具身认知的设计。以下通过两个具体案例，一正一反地分析盲人具身认知的设计原则。

（1）盲文的动态渲染

自从布莱尔发明6点盲文后，盲人在学习、生活与工作中都广泛地使用盲文系统，主要以纸质的盲文图书形式呈现。随着计算机的出现和普及，盲文点显器以计算机外设的形式，用于帮助盲人阅读数字的文字信息。

盲文的书写和排布与所在国家的文字一致，比如中文的盲文与大多数文字一样，也是横排书写，从左向右阅读。因此，盲文点显器设备从设计上

---

①② 刘晓力. 交互隐喻与涉身哲学——认知科学新进路的哲学基础[J]. 哲学研究，2005(10)：73-80.

完全没有改变盲人用户的阅读习惯，依旧保持了横排、从左向右的方式。而且，每一个点方中 6 点的尺寸细节也与现行盲文高度一致。如图 5.2 所示，本课题组设计开发的触觉图形显示终端中，每一个凸起的点直径、点高度和点形状都经过了仔细考虑和设计，以便于盲人用户从多年的纸质盲文学习中无差别地迁移过来。

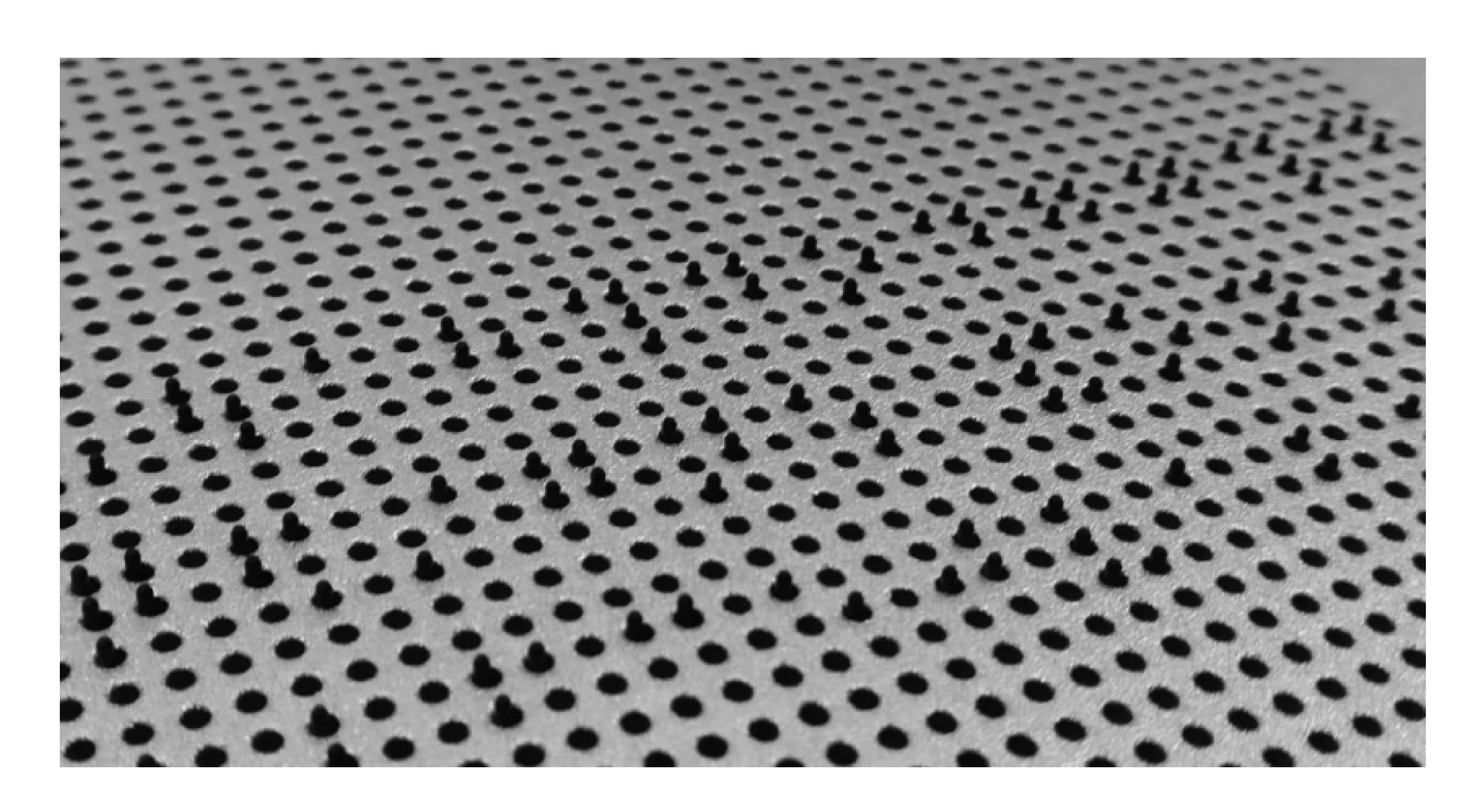


图 5.2　布莱尔 6 点盲文的动态显示

（2）非“具身认知”的知识学习

盲人朋友也需要进行语言、文字、图形图像的知识学习，对于他们的学习和生活经验来说，文字（包括中文文字、英文文字或数字等）都是以 6 点盲文的形式学习、记忆和承载的。然而，以数字为例，市面上的阿拉伯数字辅助学习工具是以实体的形式描绘阿拉伯数字的形状，如图 5.3 所示；但事实上，盲人的认知习惯不是去理解数字的形状，而是 6 点盲文形式的数字，如图 5.4 所示。



图 5.3　阿拉伯数字辅助学习工具

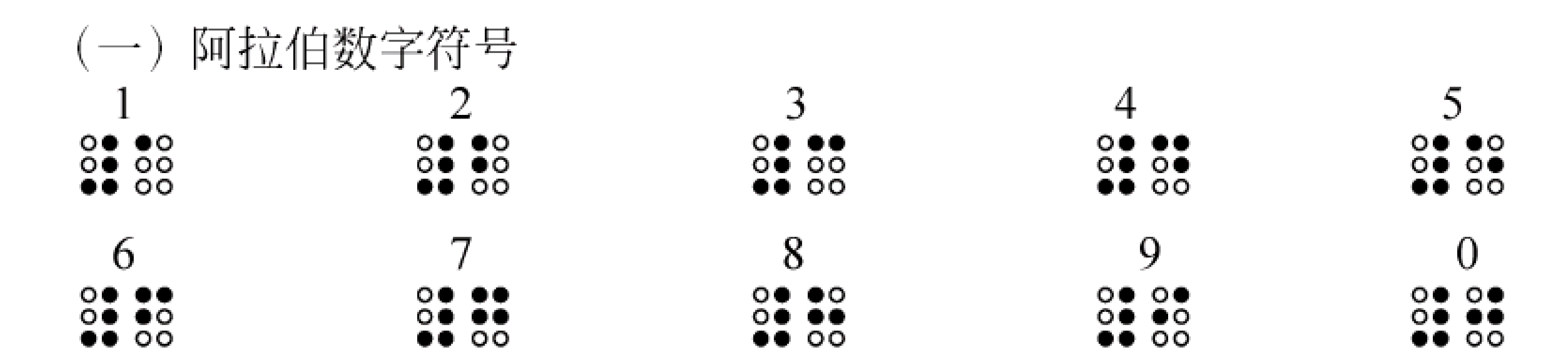


图 5.4　通用盲文中的数字书写形式①

这两种阿拉伯数字的认知体系是完全割裂的、不一致的，对盲人用户知识学习和日常生活的帮助性要打一个问号。因此，任何关于盲人触觉交互的设计都要进行“设身处地”的思考，符合盲人用户的心理图示、范畴和概念。

5.1.2　合理使用隐喻

隐喻(metaphor)表示用隐藏、暗示的方法建立在两个意义所反映的现实现象之间的某种相似的基础上的引申方式，是认知语义学研究的焦点。亚里士多德认为“到目前为止最伟大的事情就是成为隐喻大师”，Emerson 认为整个自然界就是人类的一个隐喻。Whorf 认为我们如果不以物质性的隐喻，就几乎不能谈及最简单的非空间性情景。② Richards 认为我们的日常生活中充满了隐喻，我们的口头交际中平均每三句话就会出现一个隐喻。而 Lakoff 和 Johnson 调查得出 70％的语言的表达方式都源于隐喻概念。刘向的《说苑・善说》所言“以其所知喻其所不知，而使人知之”，说明了隐喻的重要作用，庄子的《寓言》所言“寓言十九，重言十七。寓言十九，藉外论之”，说明几乎所有的语言都具有隐喻的性质。

笔者认为，隐喻的本质为联系。世界的万事万物都是联系的，有的是强联系或明联系（如打雷—下雨；下雨—打伞），有的是弱联系或暗联系（如地球自转的偏转角—夏时制；甚至是蝴蝶扇动翅膀—千里之外的台风）。自然界之间、自然界与人和人与人之间都存在这种联系。单层的联系是少部分，绝大多数因素都存在多层的、复杂的联系。而隐喻就表达了某种非单层的、非直接的联系。作为设计者，合理地考虑隐喻，并使用隐喻，对用户体验有显著的正向作用，尤其是对盲人用户。

盲人用户由于视觉受损，认知通道的劣势导致认知难度的升高，因此盲

---

① 李伟洪，等．中国盲文［M］．2 版．北京：华夏出版社，2010．

② 王寅．认知语言学［M］．上海：上海外语教育出版社，2007．

人用户需要比一般人更多的认知引导。隐喻的界面在程序功能和用户经验之间建立了桥梁,促进了用户的认知和推理。①

以触觉图形图像举例,广义地说,触觉图像就是真实图像的一种隐喻,比如物理轮廓——凸起轮廓、物体颜色/材质——凸点纹理、真实图像比例——触觉图像比例等元素。对此,北美和欧洲的研究机构先后推出了触觉图像设计方法与原则的指导性文献。②③ 触觉图形需去除图形中复杂冗余的信息,抓住被描述物体最显著的形态,并尽量减少失真地转换为触觉图形。对触觉图形显示器来说,除了点阵面板,设备的功能按键需与点阵配合使用,比如盲人用户需求最多的上、下翻页键。其位置的设计需考虑图像的触摸方式,利用触觉图像和按键等触觉交互构造传统盲文图书的隐喻。

如图 5.5 所示,清华启明星推出的新型点显器 V6,在保持动态的盲文输出功能的基础上,在左右两边提供了上下翻页按键,实现了物理实体上和虚拟内容上的有效统一。另外在上方根据用户手指的位置设置了 8 个实体按键,迁移了用户使用键盘时的手型和习惯,从而提供了良好的触觉交互体验。



图 5.5　清华启明星 V6 点显器④

5.1.3　动态示能与动态限制的统一

触觉交互体验的对象通常为承载虚拟的数字信息的实体,具有虚实结

---

① 朱小杰. 图形用户界面设计中隐喻的作用研究[J]. 装饰,2014,3:116-117.

② Schuffelen M. On editing graphics for the blind[M]. The Hague: Netherlands Library for Audio Books and Braille Press, 2002.

③ Guidelines and Standards for Tactile Graphics[M]. Baltimore: Braille Authority of North America, 2010.

④ 清华启明星 V6 点显器:http://www.qhqmx.com.cn/V6.html.

合的特点。因此在体验设计上，实在体验和虚拟体验两者在体验生成上达成和谐、统一的关系，需要动态示能与动态限制的统一。

与传统的静态实体区别的是，承载数字信息的实体的一大特点是动态的、时变的，在有限的实体区域内表达无限的数字信息。同时，盲人的触觉认知和交互要求实体的稳定性、可变性和可操控性。何时使实体进行信息的动态呈现，何时使实体接受操控，以及它们之间的相互关系，是处理好实在体验和虚拟体验统一的关键点。而动态示能和动态限制的统一原则回答了这个问题。2.5.3 节介绍了 inFORM 项目，在一个 30×30 可动态变换高度的幅面上讨论了动态示能和动态限制。

示能（affordance）来源于心理学词汇，由 Gibson 在 1979 年提出，由动词“承担、承载”（afford）变形为名词形式，表示提供承载的能力，又翻译为功能可供性、赋能等。本书着重表达触觉交互为盲人提供理解和认知的能力，故以“示能”为主要翻译。Norman 在 1999 年引用了 Gibson 的 affordance，并将之引申，使其成为人机交互领域的词汇。同时，Gaver、Hartson、Kaptelinin 等研究学者对此进行了深入的讨论。[①②] 笔者认为，示能的核心意蕴是在人机交互中通过某种形式的界面，使用户理解和感知机器提供的某种选择、功能或能力，用户因此而进行学习和操作。

在实体交互中，以本课题的触觉图形显示器为例，该设备以实体形式动态显示调节大小的功能，表达了动态示能性，如图 5.6 所示。

相对应地，图 5.7 表示了实体交互界面的动态限制，即圆形周围都处于“不可用”的状态，用户手指在圆形的限制区域内进行移动和调节。

动态示能和动态限制组成了触觉交互有机的输入与输出。针对盲人用户，他们在触觉方面更需要示能与限制的引导，以从心理和认知上接受触觉的交互和操作，从而实现实在体验和虚拟体验生成的统一。

5.1.4 成本控制

成本控制在任何交互设备的设计和开发中都非常重要，特别是针对盲人用户的触觉交互。目前在市场上，面向盲人的触觉辅助设备普遍价格昂

---

① H. Rex Hartson. Cognitive, Physical, Sensory, and Functional Affordances in Interaction Design[M]. 2012.

② Victor Kaptelinin, Bonnie Nardi. Affordances in HCI: Toward a Mediated Action Perspective [C]//Proceedings of CHI 2012.

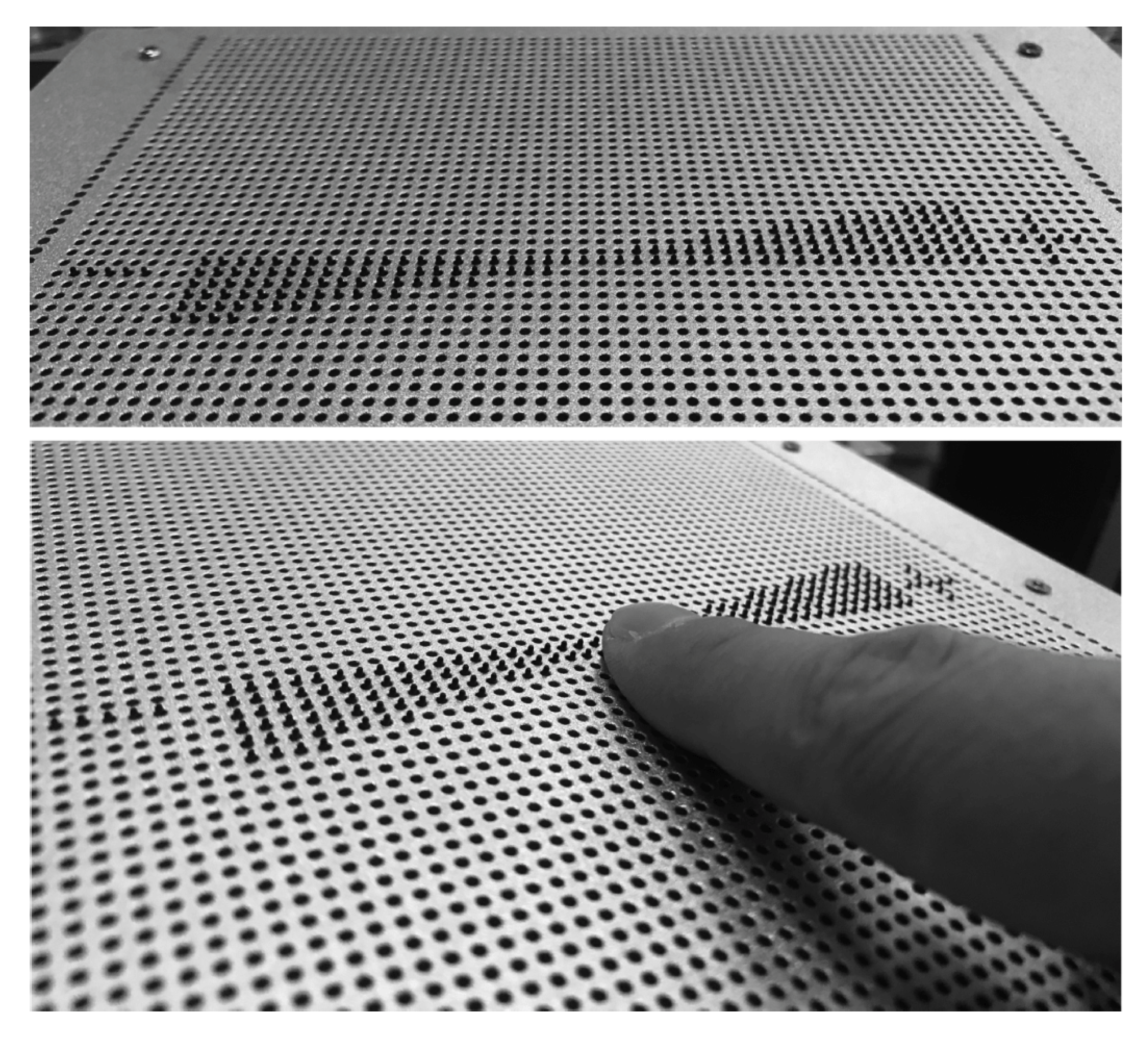


图 5.6　动态示能：动态渲染大小调节功能

贵，且针对图形图像的学习，目前广泛采用的压电陶瓷技术应用在较大尺寸的触觉显示器中，整体成本远超出了一般用户的承受范围。以图形显示器为例，德国 Metec 公司的 Display7200 售价高达 5 万欧元；该公司的盲文点显器也近万欧元。国内的点显器产品相对便宜，但也在 1 万～3 万元人民币之间。大部分盲人用户没有能力负担这些设备，用户体验便无从谈起。

事实上，相比一般人群，盲人群体的生活、劳动能力在一些环境下可能会受到影响，他们对价格会更敏感。因此触觉图形显示器的设计方向需要向低成本发展。考虑到盲人探索触觉图像需要较长时间，在成本控制的前提下，可以结合低成本的驱动方式，通过减慢刷新时间来节省成本。而且触觉显示器可以通过语音辅助，交替调动盲人的触觉和听觉，又给触觉图形的刷新余下了时间。因此一个驱动器可以依次驱动多个触点，通过减少驱动器数量来降低成本。

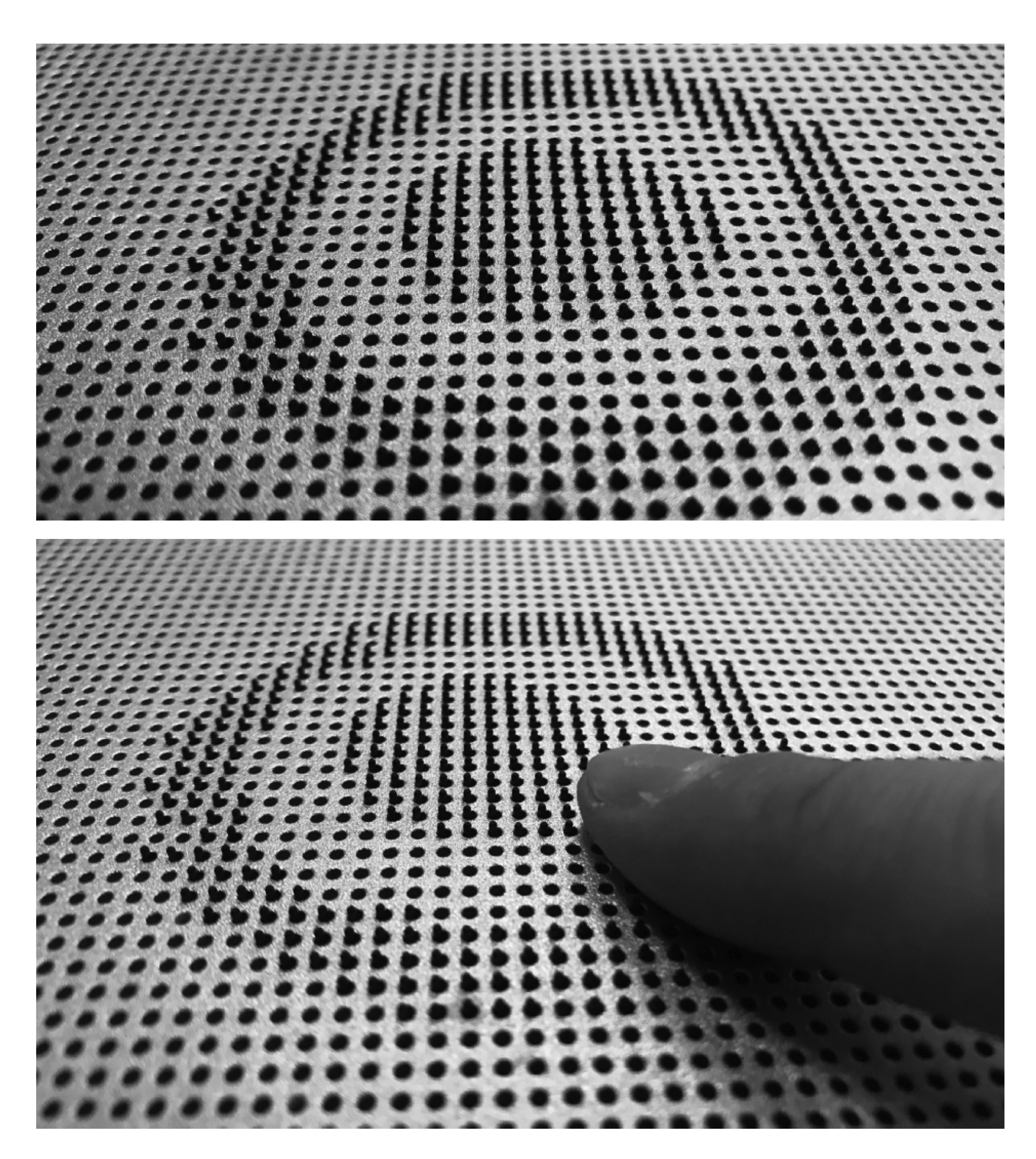


图 5.7 动态限制：在圆形限制区域内进行调节控制

5.2 设计目标：信息无障碍

王明旨教授在《工业设计概论》一书中指出：设计引导着人们的生活方式，对设计产品的选择，也就是人们对生活方式的定位和选择，其中包含了价值观和人生观的内容；设计的发展历史是一部关于生活方式的历史，一部人类社会发展的历史。[①] 王教授在此指出了设计的本质和目标。

① 王明旨. 工业设计概论[M]. 北京：高等教育出版社，2007.

人类社会的生活方式决定了设计，同时设计对生活方式具有能动作用。意思是人在特定时代、场景中有某种需求，因此相关设计师根据需求进行设计，试图满足该生活方式的需求。同时，一些开创性的设计引领了市场和人的生活方式，比如 iOS[①] 和 Android[②] 移动端操作系统，通过点触、滑动等交互，撑起了移动互联网的巨额经济产业。

盲人是社会的弱势群体，但他们拥有与正常人一样平等生活的权利。政府在保障残疾人群方面起到了重要作用。美国《康复法》第 508 节提到：联邦政府及地方办公室必须使用无障碍的电子信息技术与产品，并要求联邦政府机构在组织、采购、维护及应用网络信息技术时，应保证身心障碍者与普通用户有同等机会与能力获取公共信息内容与服务。目前，全美大约有 100 多个专门开发残疾人用品和服务市场的网站[③]，不少发达国家已建立了完善的社会保障体系。我国的无障碍建设虽然起步较晚，但在《残疾人保障法》的推动下，强化了无障碍建设，特别是信息交流无障碍建设的内容。[④]

设计在其中起到了重要作用。设计使信息变得更容易获得，使盲人朋友逐步获得跟明眼人平等的学习、生活和工作的权利。归根结底，本设计研究的最终设计目标是：信息无障碍。

而且，触觉交互是信息无障碍的一个重点发展方向。在 GUI 图形用户界面中，信息的获取绝大部分依靠视觉，虚拟的数字信息仅通过显示屏幕表现，造成虚实的隔阂。而通过触觉交互的实体交互界面建立了虚拟与现实的桥梁。实体的界面可以通过视觉、听觉和触觉等多通道方式表达，对某一种感官受损的残障朋友而言，他们还能通过其他感官方式理解同样的信息，实现了通用设计。

美国 MIT 媒体实验室 Tangible Media Group 实体媒体组对于实体交互界面有如下“激进的原子”的构想。[⑤] 在数字世界和物理世界的架构中，GUI 图形用户界面的信息沉于水中，我们只能看到水面的样子，并用“远程

---

① iOS：美国苹果公司推出的手机操作系统，适配于 iPhone，以设计感和美感闻名。

② Android：美国谷歌公司推出的手机操作系统，适配于三星、华为等手机，具有全球最大的手机占有率。

③④ 王欣. 信息无障碍领域技术与产业发展现状[J]. 信息技术与标准化，2011.4：18-22.

⑤ Ishii H，Lakatos D，Bonanni L，et al. Radical Atoms：Beyond Tangible Bits，Toward Transformable Materials[J]. Interactions，2012，19(1)：38-51.

控制”的方式，如鼠标、键盘等，与虚拟信息交互。在TUI实体用户界面中，信息就像“冰山”，一部分位于水面之上，以物理的形式呈现，并参与交互。而“激进的原子”是对未来动态实体交互的愿景。它将实现所有的数字信息都存在于物理实体之上，并可以直接交互。这种交互实现了视觉、触觉、听觉的多感官引入，作为无障碍设计和通用设计，成为盲人群体触觉交互设计的最终目标。

5.3 设计要素

信息无障碍的设计目标以及数字世界和物理世界的深度融合作为未来的愿景，难以直接指导面向盲人的触觉交互体验设计。本节以触觉认知及交互为理论，以设计原则为纲领，以设计目标为方向，探讨盲人触觉交互体验的设计要素，作为具体的设计手法和任务。如图5.8所示，从信息时间和空间、产品功能与数字内容、信息架构与交互逻辑、产品造型和用户界面等四个维度切入，切入角度由远及近、由底层到顶层。

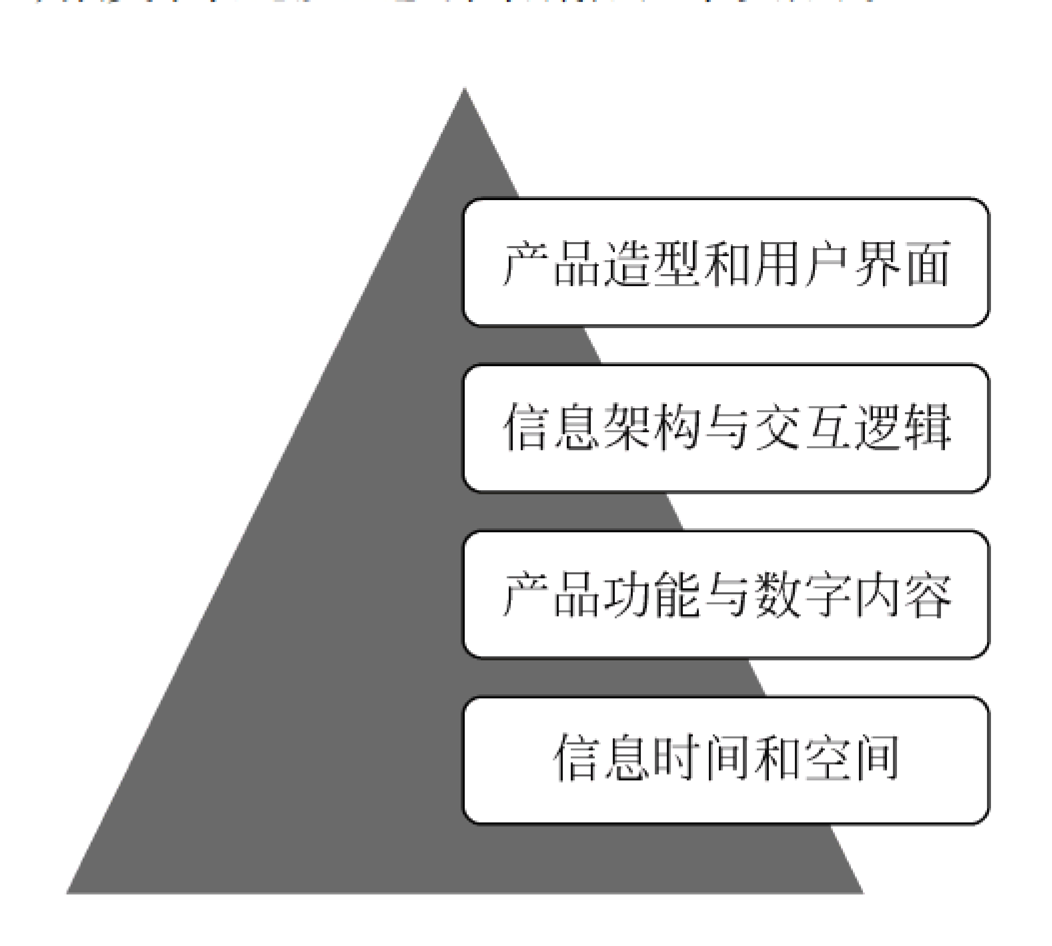


图5.8 设计要素结构

5.3.1 信息时间和空间

首先，设计师需考虑具体产品的目标和触觉实体交互空间的功能所在。反映在触觉交互体验的设计要素，就是信息时间和空间。

交互的时空是可设计的，也是首要被设计的。在盲人的触觉交互体验设计情境下，交互的空间位置设计在哪里？交互行为与交互实体依时间产生怎样的变化？这些是设计师首要考虑的设计要素。

在空间上，必然会涉及至少两个空间，一个是物理空间，一个是信息空间。触觉的实体交互为两个空间搭建了桥梁，因此桥梁的设计即为交互信息空间的设计，从而实现两个空间的无缝融合和用户认知的无缝迁移。

在时间上，由于交互的实时与实体材料的实时响应，改变了以往静态的交互时间概念。对盲人用户而言，用户具有随时间改变的意识感知；对实体产品而言，产品随时间改变示能性与产品语义，并改变使用方式和使用规范。因此，时间和空间的双重动态赋予了盲人用户无限的触觉交互的可能。

5.3.2　产品功能与数字内容

通过对信息空间和时间的设计，设计师带着“通过触觉交互产品，我们想要什么、盲人用户想要什么”的明确认识，深入到触觉交互产品的功能和内容。

功能指事物或方法所发挥的有利作用，是任何产品的基本属性。面向盲人群体，以触觉交互为主要方式的产品功能，在用户输入端主要有文字阅读、图形/实体学习、生活辅助等；相对应地，在用户输出端主要有文字打字/盲文打点、图形绘画、实体控制等。设计师需要从目标性的信息时空的设计，落地到触觉交互的功能设计。

内容在字面上指产品某项功能的内涵，但在交互和软件系统中，内容可以与功能并称为“特性”（feature）。[①] 比如盲人阅读的文字内容、图像内容等。事实上，实体交互的数字内容是实体用户界面中激发交互行为和物理实体造型功能改变的重要推手。数字内容的含义以用户的交互意图为推进方向，含义同时也是连接物理实体与数字信息的重要连接点。[②]

通过对抽象的信息和具象的实体表现的规律分析，可以生成相互关联性与运动变化的规律。

特别注意的是，色相、明度与纯度的视觉符号虽然不能直接被盲人所用，但在设计交互功能和内容时也要加以考虑，因为实际的使用场景很多时候是盲人与明眼人并存的。视觉符号的有效使用能让明眼人更有效地辅助盲人，并在一定程度上降低相互交流的障碍。

---

① 加瑞特 J J. 用户体验要素：以用户为中心的产品设计[M]. 范晓燕，译. 2 版. 北京：机械工业出版社，2014：4-17.

② 郝凝辉. 实体交互界面 TUI 设计方法研究[D]. 北京：清华大学，2014.

5.3.3 信息架构与交互逻辑

在确定了信息时空、设计功能和内容之后，接下来要考虑功能的可用性、易用性和有效性。在交互设计语境下，即为信息架构与交互逻辑。它将设计的关注点从抽象的信息时空和功能内容，转移到更能影响最后体验的具体因素。

信息架构与交互逻辑的意义在于探索内容的“模式”(patterns)和“顺序”(sequences)。信息架构侧重如何将信息表达给用户的因素，关注用户如何认知信息的过程。对于产品而言，信息架构就是呈献给用户的内容信息是否是合理的、有意义的。交互逻辑在于影响用户执行和完成功能任务的因素，关注“可能的用户行为”，同时定义系统“如何配合与响应”这些用户行为。

以目前盲文点显器的改进设计为例。鉴于以往的设备都需要连接电脑，配合网页浏览器使用，目前已有一些点显器功能的集成创新，即内置电脑浏览器功能，可以单独使用。对此，这种“PDA”型设备需要设计独立的操作系统和信息架构，以及最适合信息呈现和控制的交互逻辑。事实上，一些产品基于多排功能按键的位置摆放、按键尺寸等变化来实现以上需求。

5.3.4 产品造型和用户界面

在与盲人用户接触最近的层面，产品造型和用户界面对触觉交互体验产生了最直接的影响。

首先，针对产品造型和用户界面的设计，是由信息时空、信息架构和交互逻辑等顶层设计决定的，正所谓“内容决定形式”，设计的步骤顺序值得注意。

同时，产品造型和用户界面本身的设计空间也对用户的触觉交互体验产生显著作用，特别是实体交互界面的特殊性，触觉涉及的实体的材质、尺寸、形状、纹理都会对用户产生功能上、情感上和其他方面的影响。比如课题组在与盲人用户的沟通访谈中得出，盲人通过触摸产品造型表面，也拥有与明眼人一致的“感受并分辨产品的档次和奢华程度”的能力。此外，根据2.2节触觉的情感分析，盲人用户在触觉通道方面的情感获取能力也与明眼人一致。

用户界面的设计更直接影响了功能性、可用性和易用性，从而与用户体验直接挂钩。触觉交互界面的元素在输出端包含盲文或图像的渲染、实体

形状的呈现，输入端包含按键、旋钮、控制条等实体输入方式。另外还有手势等方式，利用物理空间，在触摸认知的同时实现操控。如何利用触觉的输入输出一体化特点，有机地将二者融合，是界面设计的重点和难点。

5.4 设计方法

课题组面向盲人用户的触觉交互体验设计，以设计原则为指导、设计目标为方向、设计要素为内容，最终推导出以盲人用户为中心、以自然交互为方式、以内容意义为根本、以信息转化为导向的设计方法。

5.4.1 以盲人用户为中心

在视力残疾人产品设计研究方法中，首先需要遵循以用户为中心的设计方法。因为作为明眼人，设计师若无法长时间亲身体验盲人用户的使用情况、习惯以及具体遇到的问题，就很难为盲人做好设计。因此以盲人用户为中心的设计方法能帮助设计师更好地了解用户需求，让盲人用户也能参与到触觉实体交互产品的设计与开发中。而此时，以盲人用户为中心更加要求设计师在设计初期的构建阶段就接触用户，逐渐与用户建立关系，深度了解，并以此定位设计方向。

结合江宁对具体方法注意事项的探索[①]，本书总结了面向盲人用户的设计学一般用户研究方法，见表 5.1。

表 5.1　盲人用户的设计学用户研究方法

方法	使用时间	注意问题	改善
问卷调查	前期	根据准备的问题以口述形式询问盲人用户，相对正式的问题可能导致用户紧张。 如：您目前使用哪些触觉交互辅助产品？	→在此时，不妨把需要问的题目和需要了解的内容列成提纲，以口语化的、轻松的方式去了解用户的生活和习惯。 改成：我刚看到你桌上有盲文点显器，平时用的多吗？除了这个还用什么别的？

① 江宁. 关于触觉交互的辅助设备研究——盲人触觉交互设备设计[D]. 北京：清华大学，2011.04.

续表

方法	使用时间	注意问题	改善
访谈地点	前期	如果在我们事先安排布置的地点进行访谈，可能会让视力残疾人有种陌生感，访谈过于正式	→访谈的地点最好尽量安排在他们的学校或家里。问的问题也尽量围绕他们生活中熟悉的内容。这里同样要避免过于正式的问题
焦点小组	前、中期	焦点小组的问题在盲人群体中会更为明显，团体中容易有意见领袖，很难听到每个人的真正看法	→焦点小组并不是很适用于未成年盲人的用户研究。因为他们大多比较内向、容易受别人意见的影响。而在面向盲人大学生团体时采用焦点小组，可以通过互相启发，更深入地讨论问题
观察	前、中、后期	在观察用户完成任务时，经常会使用录像的方法，但盲人经常会有不愿意参与录像或拍照的情况	→在观察实验以前必须要有很好的准备工作，在前期调查、访谈的时候就要与用户建立良好的关系，并且将原因妥善地讲给盲人听，在不要让用户觉得不舒服的前提下，与用户商量拍摄事宜
出声思考	前、中、后期	出声思考为用户较为不习惯的方法，在视力残疾人操作的时候，本身就会思考比较长的时间，特别是任务难度高的时候，心理的挫败感更加会导致没法完成出声思考的要求	→出声思考并不是很适用于盲人用户的研究方法。想要了解用户在使用时的想法，不妨把每次的任务都安排得长短得当，避免过长，然后在任务结束后询问用户的感受和想法

续表

方法	使用时间	注意问题	改善
卡片分类	前期	由于盲人无法看到卡片，普通的卡片无法使用	→卡片分类同样不适合盲人用户，关键原因在于触摸理解卡片并分类的效果远不如通过视觉
评估测试	中、后期	评估测试与前面遇到的问题是一致的，不能让气氛过于正式	→要更多地以盲人的角度思考，与用户建立比较好的关系，在评估测试时保持轻松气氛

通过以上设计学的用户研究典型方法，设计者可以比较深入地走到用户的具体生活场景中，观察用户的生活，加以访谈等一系列方法，从而确定设计的目标、需求、内容、交互以及形式。

5.4.2　以自然交互为方式

在人机交互界面设计的发展过程中，许多操作设备如键盘、鼠标等，本质上是方便计算机理解用户的意图，是“计算机强加给我们的要求”[①]。用户好似从熟悉的物理时空走入了虚拟的、陌生的数字时空，必须学习新的方法来适应虚拟的环境。在这个世界里，计算机“总给人一种非生物性的冷漠感”[②]。为了克服这个问题，用户界面设计师不断探索更自然的、更直观的、更符合人的行为习惯的交互方式，即自然交互界面。[③]

自然交互界面拉近了两个时空的距离，减少了用户与计算机的隔阂。它使人机交互的过程更接近于人原来的自然交流的方式，使用户无须专门适应及学习，只拥有日常的交流技能即可操作计算机。这样，就减少了再学习的认知负荷，提高了交互的效率。

在 2008 年美国消费电子展(CES)的开幕演讲中，比尔·盖茨就提到，

---

①② 潘永亮. 人机交互界面设计中的自然化趋势[J]. 装饰，2008(181)：130-131.

③ 普瑞斯 J，罗杰斯 Y，夏普 H. 交互设计——超越人机交互[M]. 刘晓晖，等译. 北京：电子工业出版社，2003.

“自然用户界面”将是下一个“数字十年”的发展方向。[①] 而在 21 世纪的第二个十年中，虚拟现实、增强现实、手势识别、实体界面等交互技术和方法都在探索如何实现更自然的交互。

在面向盲人用户的触觉交互设计中，目前实现自然交互的两大趋势是“触听结合”和“沉浸式交互”。随着人工智能和自然语言理解技术的发展，以苹果“Siri”[②]为代表的语音助手在商用市场中得到了广泛应用。语音的自然交互能极大地辅助视力受损用户的触觉交互和操作，因为一般的控制按键占用了宝贵的触觉资源，可以用声控的方式寻求代替。针对文字信息，计算机的文字转语音合成技术能使盲人用户更快地阅读理解文字。因此，盲人用户在进行人机交互时，大部分的抽象信息（如文字、功能控制）都可以以语音的方式完成，相比触觉也更有效率。同时利用触觉的优势，进行具象的物理信息的认知学习，实现触听结合、互为辅助的自然交互体验。

“沉浸式”起源于触、听、视觉多通道研究，现多用于视觉的沉浸，比如虚拟现实，主要从视觉上实现了用户沉浸于虚拟世界的体验。而在盲人的触觉交互中，“沉浸式”指触觉实体承载的信息遍布用户周围，触觉的信息获取通道实现最大化。因此在实际场景中，理想的沉浸式交互是盲人用户生活场景中的每一个实体都是可动态交互的，交互效率和认知体验则会显著提高。

随着物联网和计算机的发展，更多的交互技术和更自然的交互方式会相继出现，从而使盲人用户能更好地克服视觉通道缺失的障碍，实现自然的交互方式。

5.4.3　以内容意义为根本

在计算机的信息交互方式显著丰富的今天，盲人用户最直接的需求与明眼人一样，即获取数字世界的海量内容。因此，盲人的触觉认知与交互是方式和手段，获取海量数字内容是意义和根本。

与盲人的需求相比，目前针对盲人群体的学习资源有相当大的缺口。国内有数千万视力受损人群，而为他们服务的只有中国盲文出版社一家出版社。图 5.9 为位于北京的中国盲文出版社和中国盲文图书馆。事实上，

① 搜狐数码．盖茨演讲内容：第二个数字十年的三大要素[OL]．http://digi.it.sohu.com/20080108/n254519679.shtml.

② Siri 语音助手应用在 iPhone 手机、iPad 平板电脑、Macbook 笔记本电脑等产品中，通过自然语言识别、云端搜索和语音合成朗读，实现语言对话的自然交互方式。

纸质的盲文图书数量远少于普通图书，包含图形图像知识的纸质图书少之又少，盲人很难通过纸质书籍满足知识学习的需求。





图 5.9　中国盲文出版社，中国盲文图书馆及藏书

相比纸质书籍的缺乏，虚拟的数字信息内容同样有信息获取障碍的问题。如前文分析，互联网上大量的图形图像信息没有一种有效的方法让盲人理解。这加剧了盲人群体与明眼人在信息认知上面的差距。

因此，盲人所需的数字内容是为盲人用户设计的根本所在。针对触觉交互带来的实体信息获取的优势，实体信息的内容则为触觉交互设计的意义和根本。以图形图像的触觉显示器为例，如何通过设计，最大化地呈现对用户有利的触觉内容信息，并保证内容信息有效地被盲人认知和理解，是触觉交互设计的核心和根本。

5.4.4　以信息转化为导向

在实际的设计操作中，目前的互联网数字信息大部分都以视觉形式呈现，特别是 VR/AR 等新兴的信息获取方式。基于视觉的图形图像信息内容如何被盲人认知理解，则涉及视觉信息的转化问题。因此，虚拟信息的多感官转化是为盲人设计的重要导向。

在信息转化过程中，触觉与听觉及相互的配合都是至关重要的。在单纯触觉认知及交互语境下，视-触觉的信息转化需要考虑触觉的生理及认知特点，比如触觉分辨率、触觉认知过程等。如图 5.10 所示，北美盲文机构根据触觉认知的能力及特点，将花的生物图像进行简化，包括关键信息提取、冗余信息简化、根据触觉特点改编等步骤，最终得到易于盲人触摸理解的花的触觉图像。

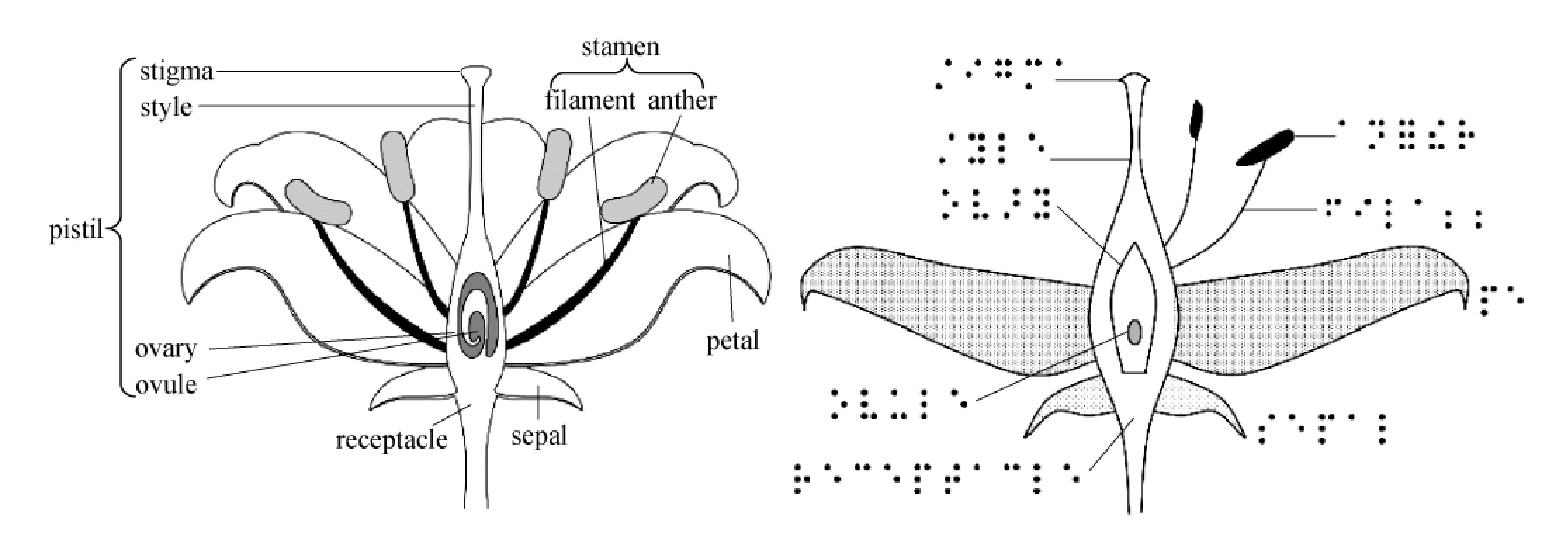


图 5.10 视-触觉图像的信息转化实例①

类似这样的触觉图形信息转化案例及指导原则还有荷兰语音与盲文图书馆(Netherlands library for Audio Books and Braille)②、美国盲文出版社(American Printing House for the Blind)③等,为盲人用户的信息转化与获取提供了重要参考价值。

触觉图形只是触觉及实体交互的一部分,广义地说,普遍的视觉信息的触/听觉转化还难以存在一个通用的方法。设计师需要根据具体信息的特点,从盲人的触/听觉认知特点出发,进行以信息转化为导向的设计。

5.5 本章小结

本章探索了基于盲人用户体验的触觉交互设计的理论与方法。以符合盲人用户的具身认知、合理使用隐喻、动态示能与动态限制的统一、成本控制为设计原则;以信息无障碍为设计目标;以信息时间和空间、产品功能与数字内容、信息架构与交互逻辑、产品造型和用户界面为设计要素;最后将以盲人用户为中心、以自然交互为方式、以内容意义为根本、以信息转化为导向作为设计方法,完成盲人触觉交互体验设计的方法论构建。

① 根据文献"Guidelines and Standards for Tactile Graphics[M]. Baltimore: Braille Authority of North America, 2010" 图 2.11 重绘,并略作改动。

② Schuffelen M. On Editing Graphics for the Blind[M]. The Hague: Netherlands Library for Audio Books and Braille Press, 2002.

③ Polly Edman. Tactile Graphics[M]. New York: AFB Press, 1994: 3-102.

第 6 章　盲人触觉图形显示器设计实践

随着互联网的广泛使用，网络中越来越多的图形图像信息与盲人朋友难以通过有效方式学习的矛盾逐渐显现。而现有的面向盲人的触觉图形显示器不管在设计还是在功能上，都不能满足大部分盲人的需求。

本章在第 2～5 章的基础上，以触觉认知理论、盲人触觉认知特点以及触觉交互体验设计的理论与方法为知识基础，进行了盲人触觉交互体验的设计实践——盲人触觉图形显示器的设计和开发，对上述研究结论进行运用与验证。

6.1　盲人“上网读图”现状与需求

在第 3 章中，通过几所盲校的访问和与盲人的交流访谈，我们已经对盲人在上网和触觉辅助设备的使用方面有了较为深入的了解。事实上，目前盲人朋友在“上网”和“读图”方面是分开的，主要原因就是缺乏一种有效的辅助设备，让盲人独立地学习网络中的图形图像。

在上网方面，电脑和智能手机的文字转语音和语音合成技术已经广泛商用，绝大部分盲人朋友能自如使用。但这仅限于文字的识别、阅读和理解。在图形图像方面，目前网上有一些提供图像的描述与解释的众包平台：盲人朋友将图像截取，发送至该平台，由明眼人负责阅读图像内容，并以文字形式作详细的描述，再返回给盲人。

这种方式利用了网络平台的便捷，以及分享、社交的特点，通过图像的语言描述，使不能被获取的信息转换为易于获取的信息。然而，这种转换过程与明眼人的个体差异有直接关系。图像的文字描述质量难以保证。如果采用多人的描述与检查方式，又占用了过多众包资源。最关键的是，它无法使盲人自己理解图形图像的实体信息，也无法提升盲人的读图能力。

针对图形图像的认知学习，目前盲人学校广泛采用纸质图像的方式。如 3.2.5 节所述，纸张触觉图像无法实时、动态地显示触觉信息，也无法帮

助盲人使用互联网。但它为盲人二维的图形图像学习提供了认知基础，也有其重要的意义。目前广泛采用的纸质图像制作方法有压印、盲文触点打印、热塑、微囊纸、Tiger 打点打印纸等。

可见，盲人用户的第一需求是以触觉图形图像的方式渲染数字网络世界中的图像信息。但目前盲校提供的静态的纸质图像与网络世界中天文数字的图像信息呈现显著矛盾。考虑到一些研究机构的触觉图形显示器的原型造价昂贵且不实用，本课题致力于设计并开发一款相对低成本的、基于盲人的触觉认知与交互体验的触觉图形显示器。

6.2 以用户为中心的场景和功能设计

在整个设计流程中，我们采用以用户为中心的设计方法。通过深度访谈、焦点小组、盲人体验的方式，实现设计的有效性与准确性。

在第 3 章的触觉认知研究中，相对大幅面的触觉图像更有利于盲人的认知，因此我们的设计思考是在设计原型阶段，采用桌面式的大幅面触觉点阵，实现图形图像的渲染。在点阵间距上，根据布莱尔盲文的 2.5mm 标准，并借鉴目前盲文图书、盲文图像的设计，在本设计实践中也采用点间距 2.5mm 的触觉点阵。而根据盲人双手的触摸认知范围，以及目前的大幅面纸质图像尺寸，我们推导出原型点阵幅面的长宽比采用 2∶1 的设计，即由两个正方形并排组成，双手在理论上各覆盖点阵的一半，在触摸认知上更符合触觉特点和盲人习惯。它与人在视觉屏幕上常见的 4∶3 或 16∶9 有一定区别。

6.2.1 应用场景设计

目前，盲人用户在一定程度上缺乏有效访问互联网信息的方法，特别是互联网中具象的、实体的信息。因此，我们设计的触觉图像终端致力于成为盲人访问互联网的接口，通过图形图像的渲染，盲人用户可以以触觉形式理解互联网丰富的图像信息。

盲人的学习、工作和生活三大应用场景都有对于具象的图形图像信息的获取需求。首先在课堂学习中，相比纸质的图形信息学习，图像显示器的“动态”优势赋予了师生实时互动和人与设备交互的更多可能。比如纸质静态图像需要在图像中注明多个“记号点”用来保证教师与学生的触摸同步，

但动态的图像可以通过设备间的通信，使师生之间触觉图像的任一位置同步变化，互动性有显著提高。比如图 6.1 的“地图”案例，教师讲解到某个细节时，相对应的位置的触点可以通过规律的上下震动方式获得学生的注意力，文字信息的学习亦然。

再者，在众多公共教育空间如博物馆中，一部分相对珍贵的文物无法被大众直接触摸，该设备可以以图像形式渲染展品照片，供用户触摸理解。图片分享是图形图像动态渲染的另一个重要引用方式。用户可以将他所看的实体图形分享给别人，通过实体动态渲染和语音通信，以触听觉沉浸式的方式呈现分享。

最后，设备内置的网络浏览器是作为互联网访问的重要接口。用户可以通过触摸理解目前互联网上以图形图像为主要呈现方式的网页信息，例如网上购物的页面信息，包括物品的文字描述和评价留言等，以及物品的外观轮廓和图像细节等信息，并辅以语音说明。这样，就能以具象实体和抽象文字的方式实现触听觉同步理解图形图像的良好体验。图 6.1～图 6.3 为触觉图形显示终端的应用场景设计。

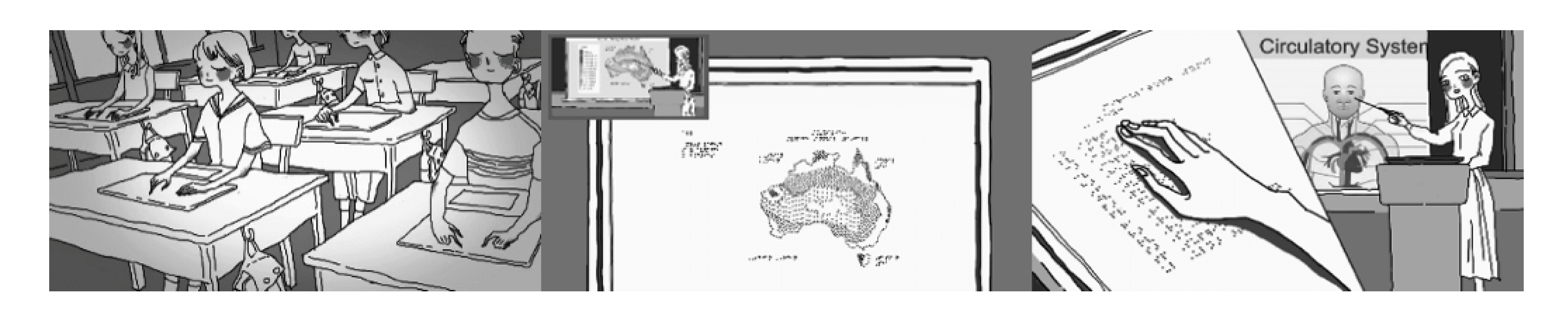


图 6.1　盲人学生在课堂中使用显示终端，理解触觉图像，学习文字信息



图 6.2　盲人参观博物馆，通过显示终端触摸展品照片，理解展品，并登录即时通信平台分享图像



图 6.3　盲人使用显示终端网上购物，并利用触觉引导理解杯子细节

6.2.2 功能设计

基于设备使用场景的需求,该图形显示终端需具备大尺寸点阵屏幕和语音系统。信息输出方面,可以实现盲文动态输出、触觉图形图像动态输出和声音(语音)输出。输入控制方面,除了按键、功能等控制功能,还需以键盘形式实现文字录入。另外引入麦克风和基于云端的语音识别功能,帮助用户以语音形式进行文字录入和设备控制。最后,在触觉图形图像的显示和交互层面,基于第3章被动触摸引导的认知实验,针对多曲线、多内容的复杂图像,触摸引导方式更易呈现图像语义,对一部分用户有更好的表现。因此触摸引导也在设计范围内。图6.4是触觉显示终端的功能设计。

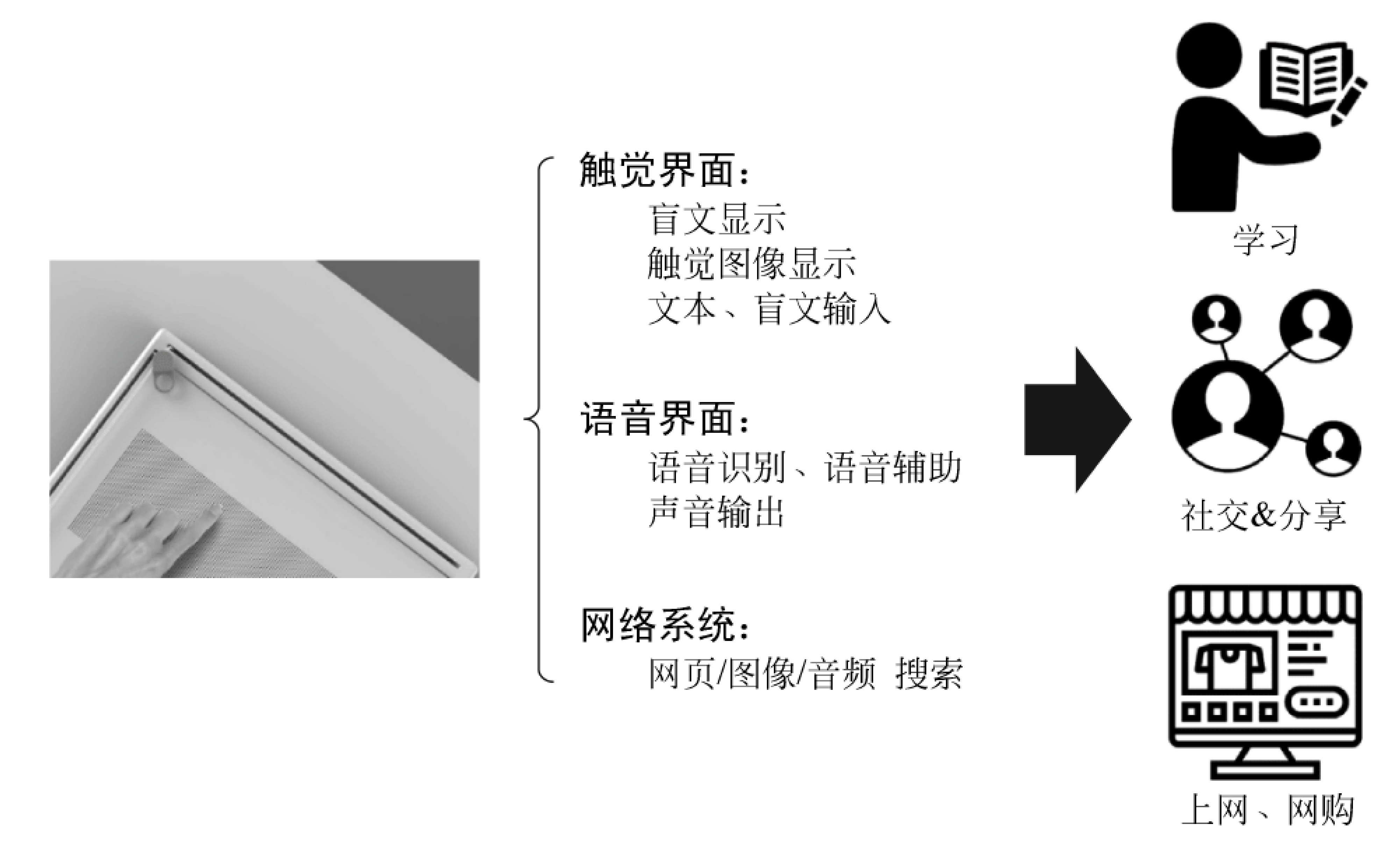


图6.4 触觉显示终端功能设计

6.3 信息架构与交互设计

6.3.1 图像生成设计

图像生成是触觉图形显示器最核心的功能。它涉及图像渲染的驱动原理、设备内部结构、图像点阵尺寸等关键因素。基于前文的触觉认知和交互体验研究,我们设计了新型触觉图形显示器。

以往的触觉图形显示器通常采用压电陶瓷驱动器,每个压电陶瓷对应一个触点,数千个触点同时升起,产生触觉图像。因此大幅面的触觉点阵通

常需要数千个匹配的压电陶瓷，而每一个压电陶瓷成本难以降低(约为 50～100 元人民币)，总成本非常昂贵。压电陶瓷的特点是反应非常灵敏，图像渲染耗时约为 0.1s。然而盲人用户对触觉图像的瞬时响应并没有特别需求，本身也需要较长时间摸索图像。

因此，我们没有使用传统的压电陶瓷技术。通过与盲人的参与式设计和用户体验研究，我们设计了一种新型触觉图像生成结构：分离驱动单元与点阵单元，从以往压电陶瓷与触点 1∶1，变成新型驱动器与触点 1∶n，一个驱动装置依次驱动多个触点，在不显著影响触摸体验的同时，适当减慢图像刷新速度，从而大幅降低材料成本。

实现点阵单元与驱动单元分离的核心手段是点阵的每个触点都含有“Push-Push”结构。此结构在生活中有很多应用，比如 SD 卡插槽、圆珠笔等，其特点是具有高低两种状态，且能在任何一种状态下锁定。点阵下方是设备驱动单元：可移动推拉式电磁铁组合。电磁铁向上产生推力，推动触点的“Push-Push”结构，从而改变点的高低状态。然后电磁铁平移，以遍历形式刷新每一个触点，点阵屏幕即可产生触觉图像。驱动单元采用多组电磁铁同时刷新触觉点阵，可将触觉图像的平均刷新时间控制在 30s 左右，保证了用户的触摸体验。图 6.5～图 6.7 为点阵、驱动器及图像生成系统的原理图。采用以上图像生成原理的触觉显示终端拥有 120×60、点间距 2.5mm 的点阵布局，即 15cm×30cm 的触觉点阵幅面。近似 A4 纸的大尺寸点阵能克服触觉分辨率低的问题，呈现单张触觉图像所需的信息量。

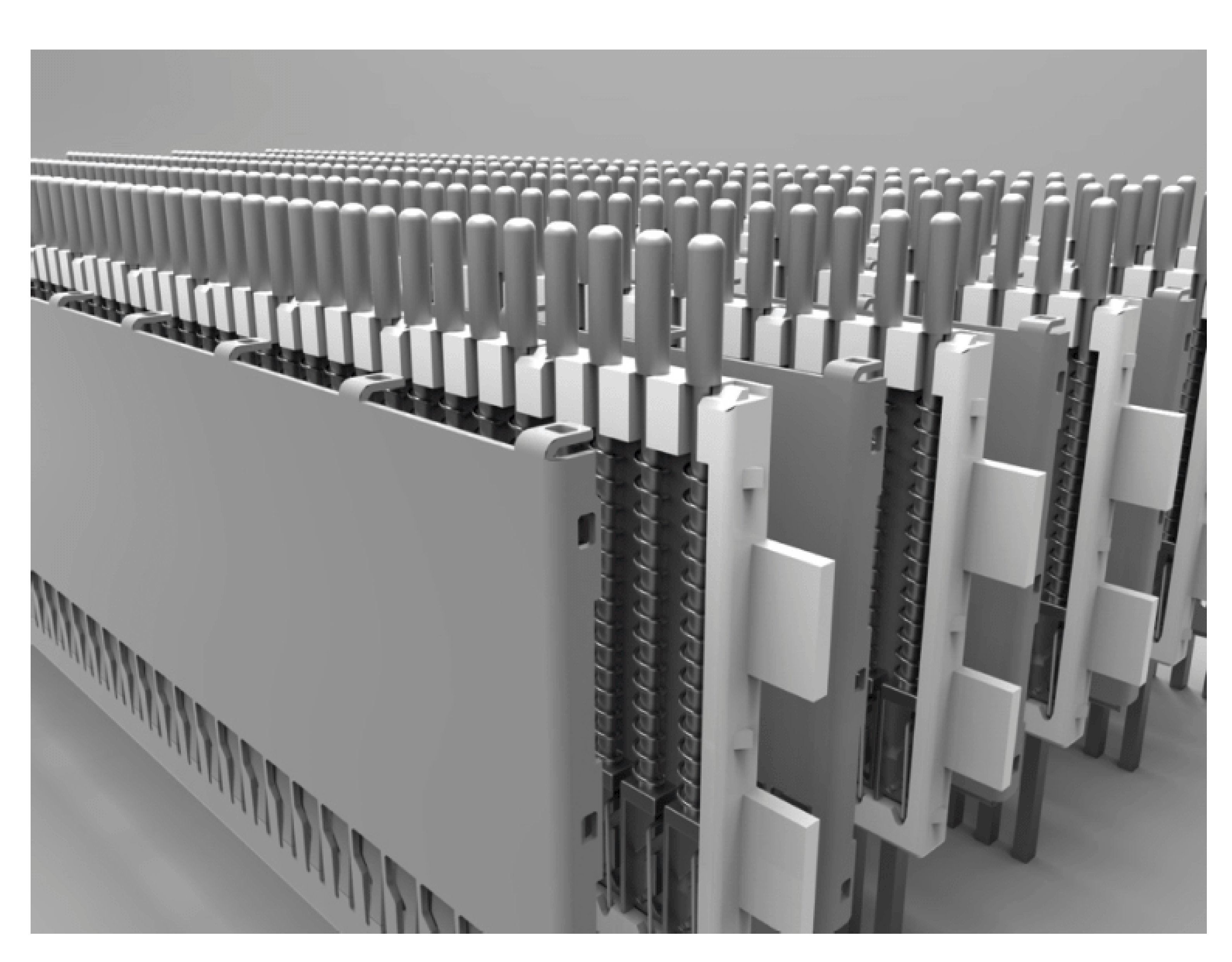


图 6.5　点阵排布原理图

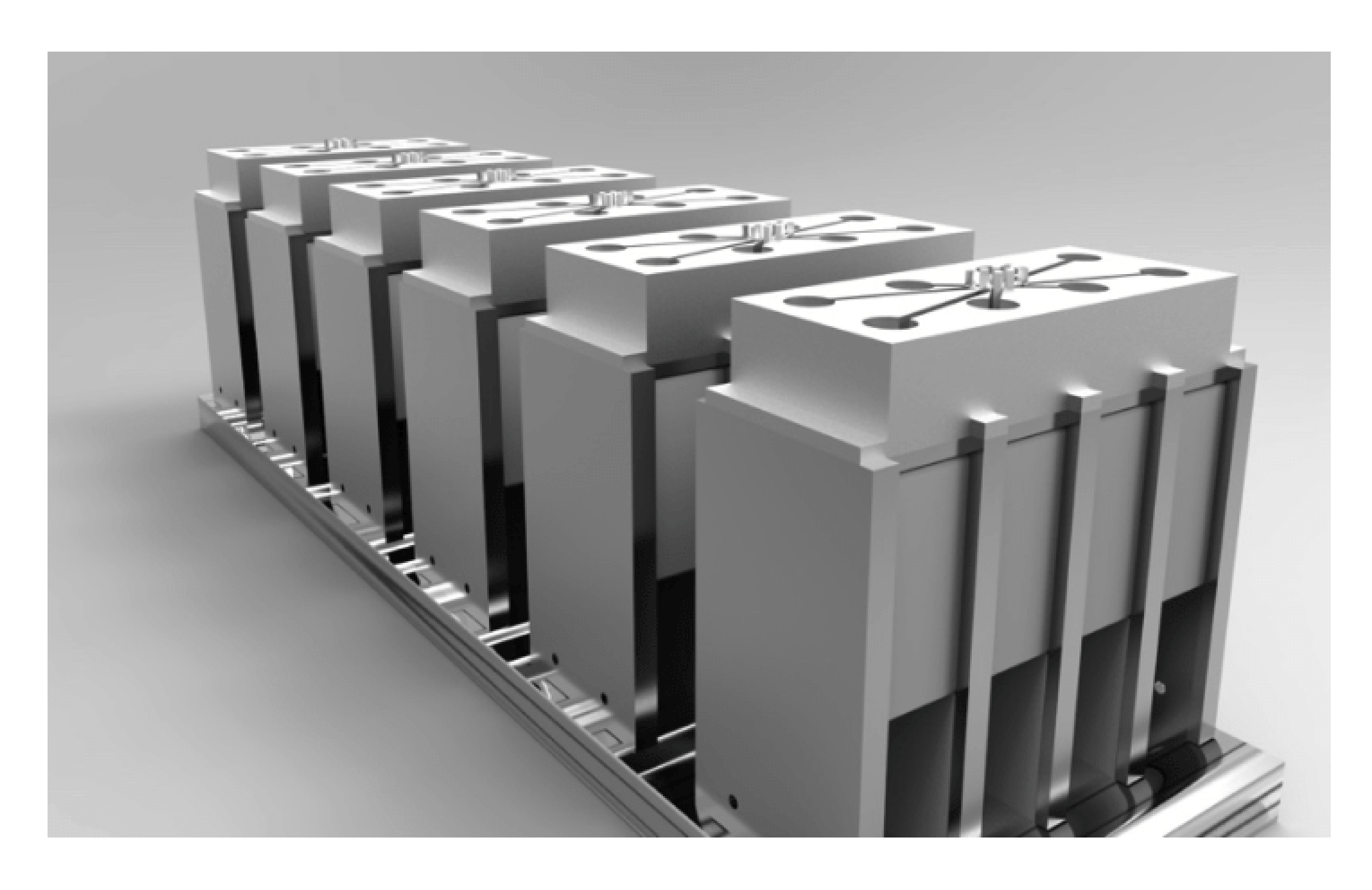


图 6.6　电磁铁驱动矩阵原理图

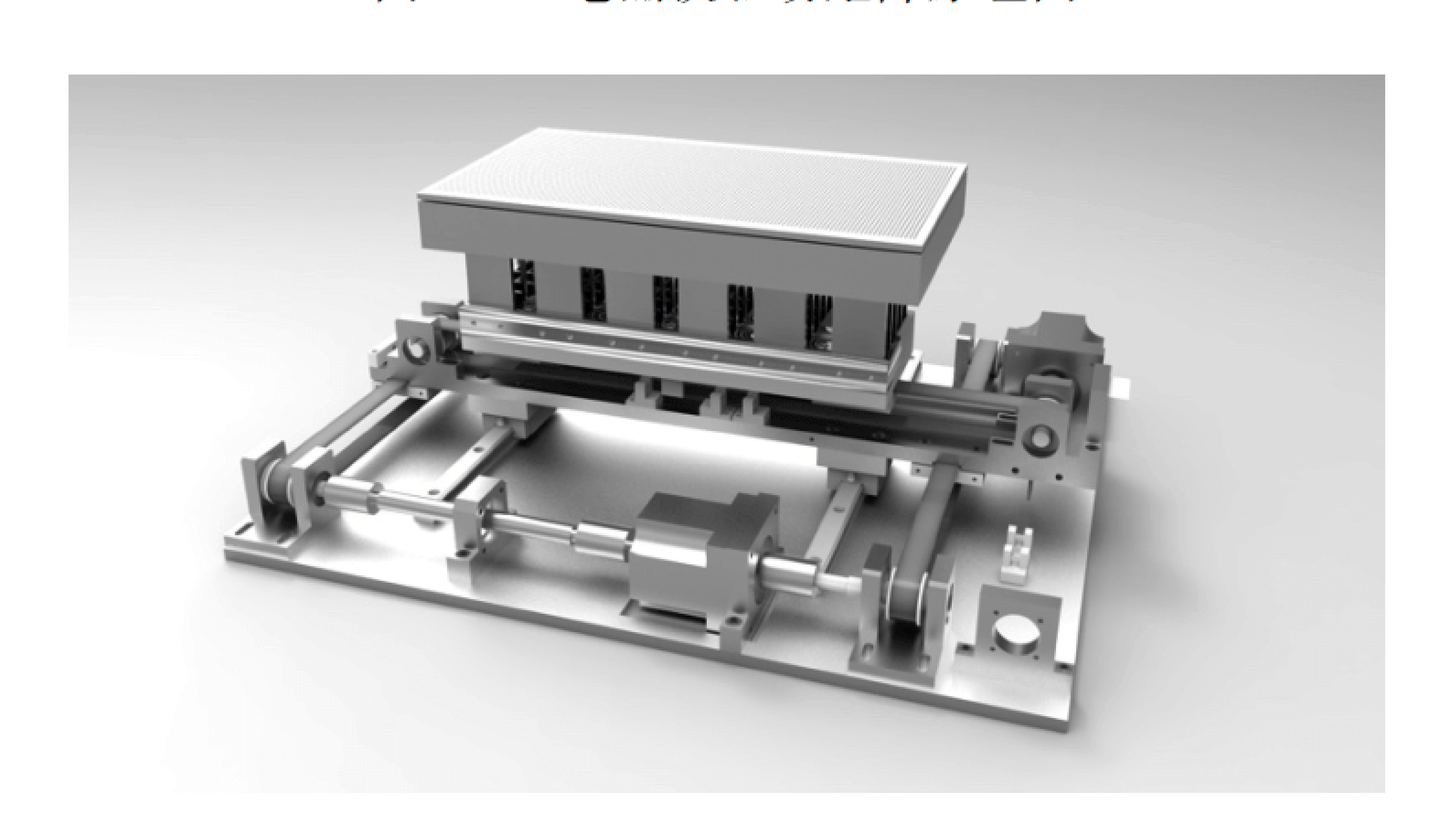


图 6.7　触觉图像生成系统原理图

在图像生成的原型开发中,我们以高可用性、高稳定性为主要目标,同时兼顾相对的成本控制。因此在“Push-Push”的选材设计中,我们对比了多种高分子合成塑料,比如 POM、LCP 等,并考虑各材料的表面光滑度和杨氏模量,即压力-形变特性、硬度。最终我们选用 Torelina PPS 树脂材料,制作“Push-Push”滑块,滑块开模和加工的精度在 10um 以内。

6.3.2　触觉交互设计

触觉认知的用户研究表明,盲人用户在语音说明和触觉引导的辅助下能显著提高触觉图像的认知能力,因此该显示终端引入了内置的语音说明和触觉引导系统。触觉引导的目的是引导盲人按图像语义的最优路线触摸,因此我们在触觉屏幕上方约 10mm 处设计了辅助引导滑块。将手指伸入引导滑块中,引导滑块在点阵上方二维平面移动,带动盲人手指按语义最

优线路触摸图形，并可与触觉图像的驱动刷新联动，驱动装置按引导路线优先刷新图像，用户触摸理解与图像刷新同步进行，弥补了刷新时间的不足。

同时，该设备可根据引导滑块了解用户的当前触摸位置，进行有针对性的语音说明。它打通了用户触觉认知与听觉理解的通道，使触听觉认知同步进行，互为辅助。在认知能力上，触觉与听觉通道占用不同的脑力资源；在交互界面上，触觉、听觉信息拥有相互独立的传输空间，不存在相互干扰。用户可将抽象的语言描述与具象的图像关联对应，从而更立体地理解信息，实现触、听觉同步理解图形图像的良好体验。

盲人用户在理解触觉显示器的信息后，还能以触觉方式操作控制。除了功能按键等基础的触觉操作手段，该触觉图形显示终端还在点阵平面中引入了压力传感器，可以识别用户的按压操作，并做出实时反馈，所触即所得。触觉显示器以此实现了触觉呈现—触觉认知—触觉操控—再反馈的交互环路，以触觉为主，触听同步，创造了盲人辅助设备的交互新模式。

6.4　显示终端的硬件设计与开发

触觉图形显示设备的触觉交互体验与功能离不开硬件支持。在硬件范畴，设备的设计与开发涉及中央处理单元（CPU）选型、功能模块及电子电路设计开发、机电一体化设计开发以及外观设计生产。

本触觉图形显示器使用英特尔最新处理器 Intel Edison① 中央平台作为控制核心。该处理器拥有小尺寸、低功耗、相对高性能和高度集成的特点，专门适用于物联网（IoT）产品的设计和开发。相比 Intel Galileo/Raspberry Pi/Arduino Series 等其他物联网相关控制核心，其高性能和低功耗的特点更具优势。基于 Edison 平台的 Arduino 系统具有上手快、适配性强的特点，在原型设计初期可以快速实现。

在图 6.8 原理图中，本设备涉及了 5V 电源、GND 地、Tx/Rx 串口收发以及 15 个数字 IO 口，用于控制电磁铁及滑台，刷新触觉图像；控制引导滑块移动，辅助用户触摸；管理语音输出模块，辅以语音描述；还有语音识别、按压感应、无线通信、盲文键盘模块，以传统桌面台式电脑的形式，为用户提供优质的触听觉操作体验。图 6.8 为设备的系统模块设计。

针对触觉图形的渲染生成，本设备使用了移位寄存器（Shift Register）—

① Intel Edison：2016 年新推出的面向物联网的移动端控制核心。

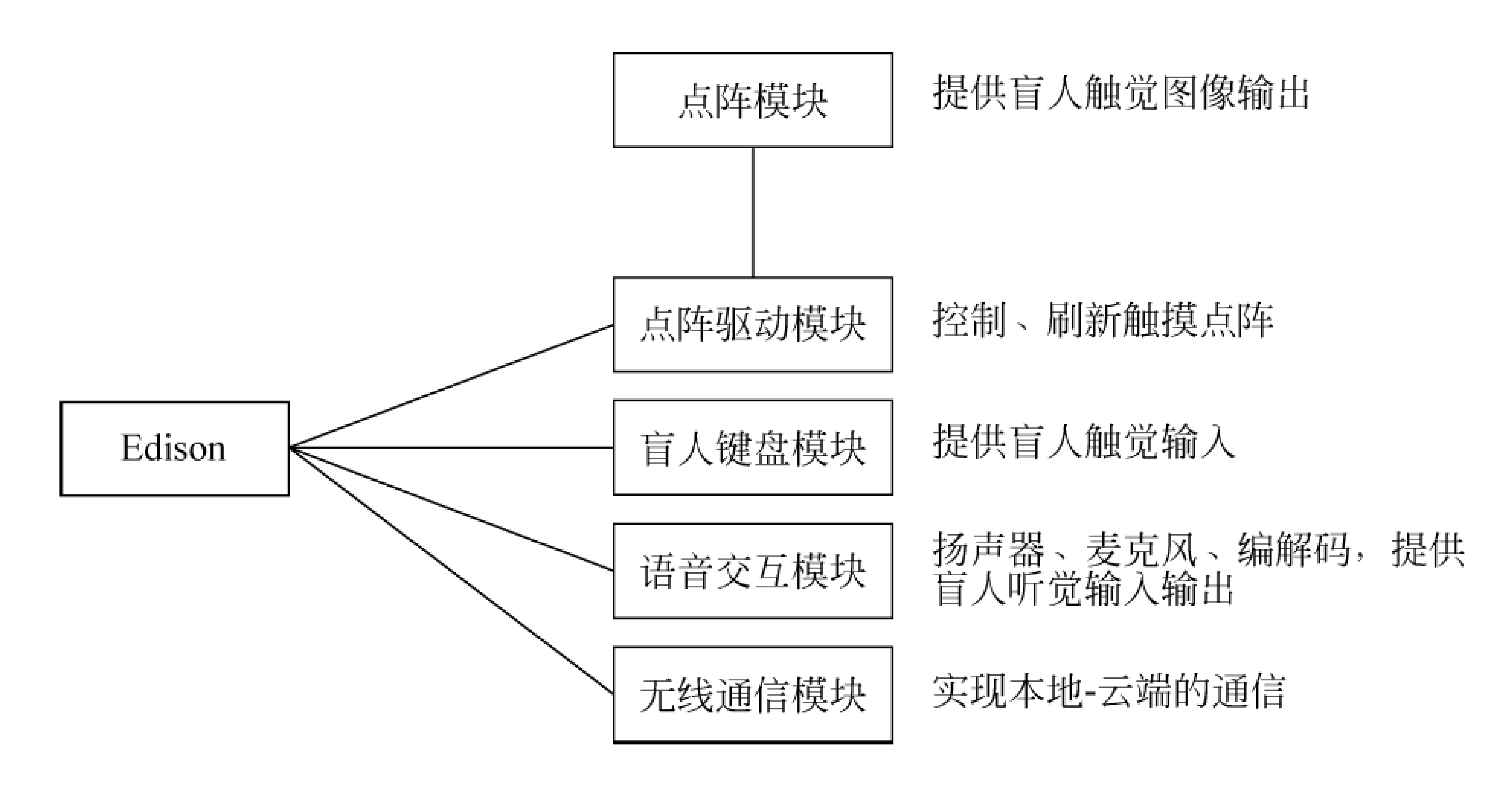


图 6.8 触觉图形显示设备模块设计

直流继电器—外接电源驱动的电磁铁点阵设计方案。控制核心接到图像渲染指令后，输出每一点阵高低的信号，通过移位寄存器 74HC64 锁存 8 组信号，再通过高电平信号同时触发，将高低信号以电磁铁的开关形式输出。电磁铁回路通过直流继电器进行控制，再同时触发，推动触摸点阵的"Push-Push"结构，实现二值高度的无源锁存。

然后通过二维平面滑台位移，重复上述驱动原理，即可实现整个幅面的触觉图形生成。图 6.9 和图 6.10 分别为显示终端中触觉图形生成的硬件开发和"THU"图形渲染效果。



图 6.9 显示终端原型开发

该图形显示设备不仅可以渲染图 6.10 中的字母图形等图形图像信息，还能够以实体形式动态显示控制和交互指令，比如 5.1.3 节动态示能与动态限制的实体表达。盲人可以通过触摸理解"大小调节""位置调节"等交互操作，且设备能根据用户的操作进行动态反馈，相比传统的旋钮等单一功能

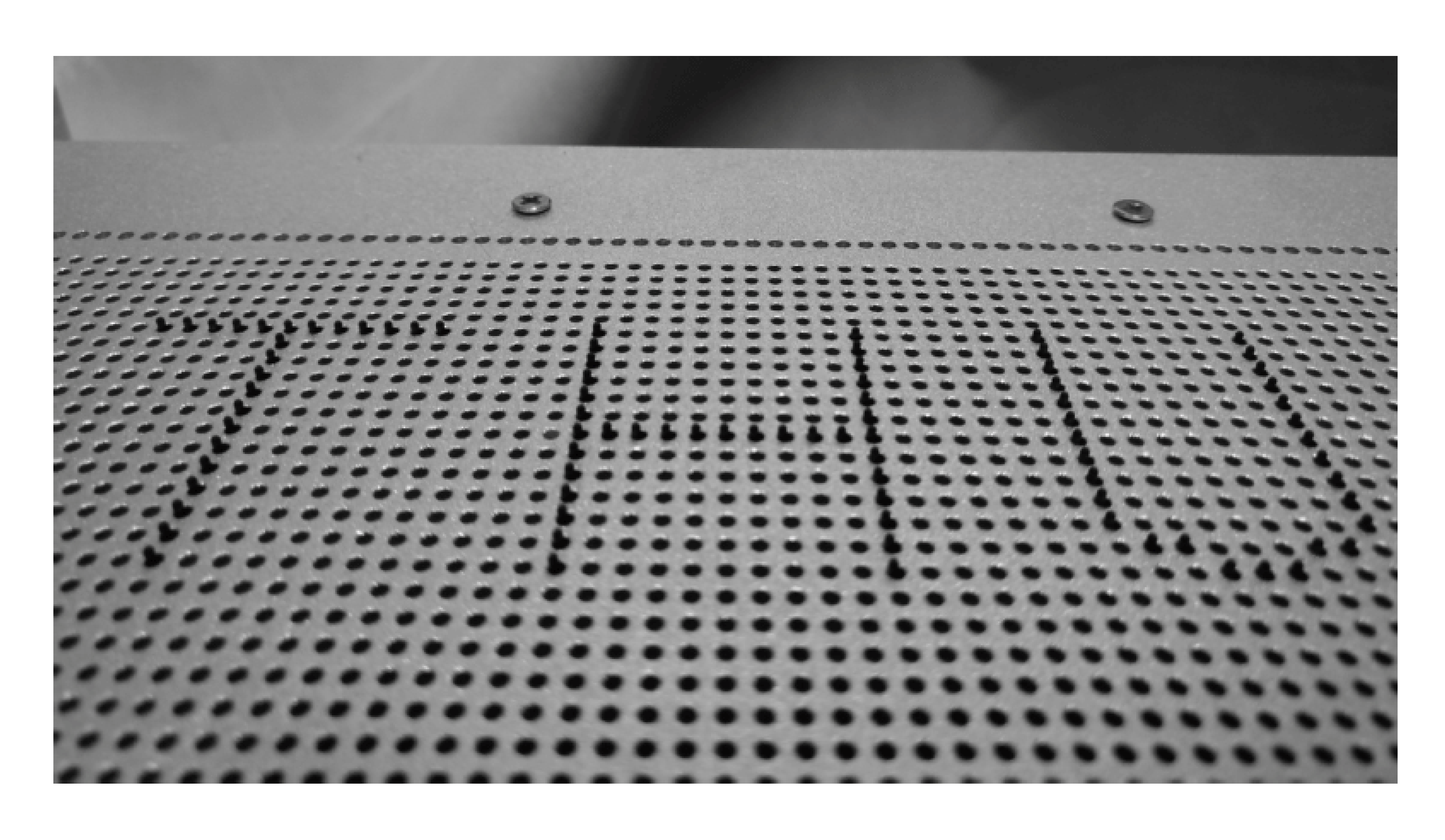


图 6.10　显示终端渲染“THU”的效果

的操作方式更直观，更有利于用户的认知和使用。

该设备的外观工业设计依然坚持以盲人用户为中心。为此我们利用在盲校和盲文图书馆的调研机会，深入观察目前盲人的桌椅特点和用户的使用习惯。我们发现盲文图书馆的阅览室桌椅全部使用相对圆润的棱角，并在对着盲人座位处有“内凹”的设计，用意是帮助盲人坐在正对桌子中间的位置，提高空间判断力。

然后，盲人在使用中，根据用户所坐的位置和习惯，通常使用桌子的 50～80cm 深，两边放置图书、个人物品等。基于以上调研和用户访谈，我们进行了该触觉图像显示终端的外观设计。图 6.11 和图 6.12 是第一版设计。

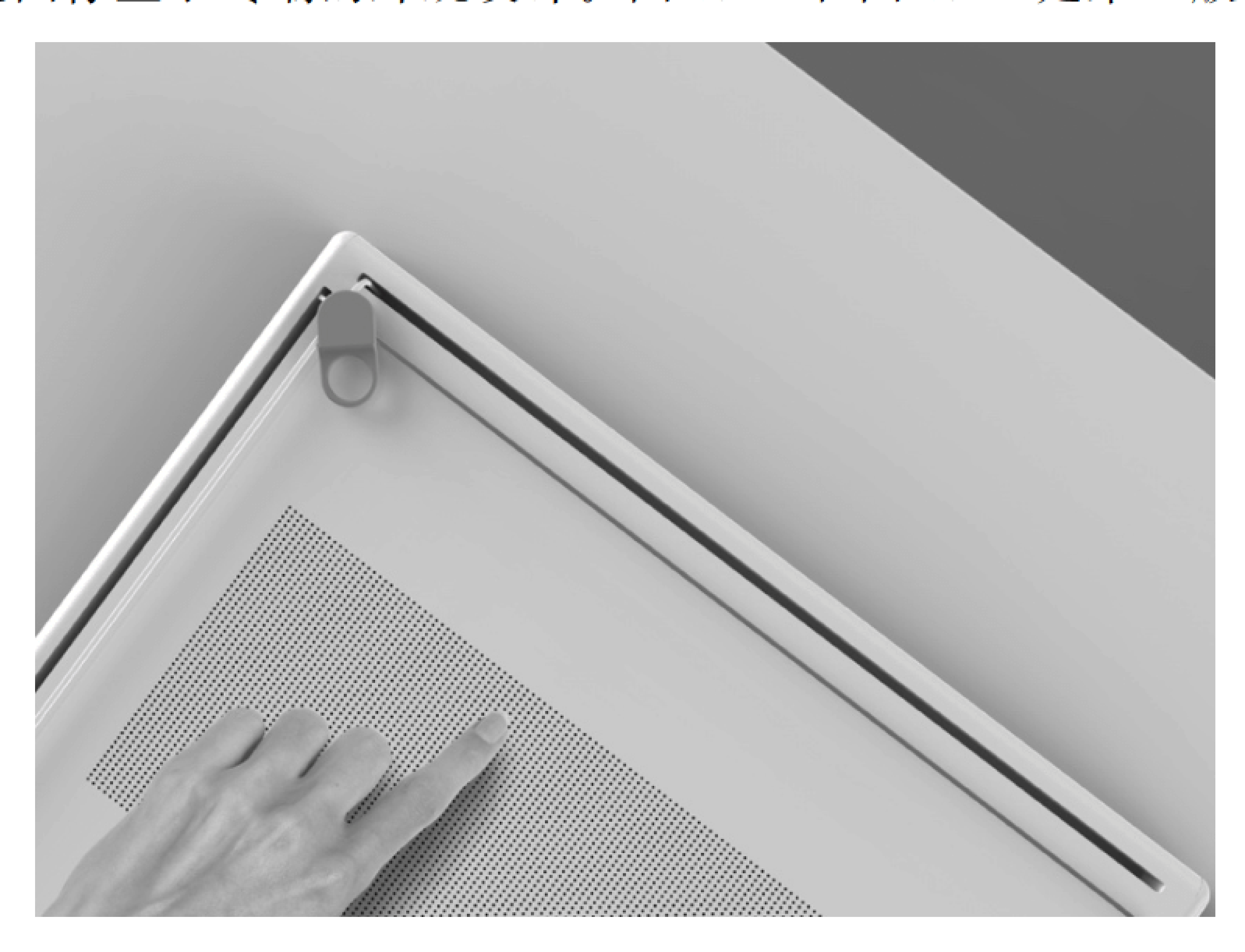


图 6.11　触觉点阵面板示意图(第一版)



图 6.12　设备整体图(第一版)

在第一版设计后,通过与盲人用户的交流反馈,我们在桌面端增加了“下凹”设计,经过模型测试,该“下凹”的设计能托起盲人的双臂,更符合人体工学设计,从而有效地帮助盲人定位和操作。同时在点阵前方设计了标准键盘,用于文字输入和设备控制。图 6.13 为第二版设备整体图。



图 6.13　设备整体图(第二版)

6.5 本章小结

本章基于前 5 章针对盲人的触觉认知与交互体验研究，进行了面向盲人的触觉图形显示终端设计实践。在设计过程中通过以用户为中心的设计，进行了场景设计、功能设计、触觉图像生成设计、触觉交互设计、触听觉多通道交互设计、结构设计、硬件设计和开发等一系列工作。该触觉图形显示器原型的结构创新实现了相对低成本的触觉图形显示，并带有触觉引导装置，配合语音描述，能提供更好的触觉认知及交互体验。我们希望这一设备能真正帮助全世界范围的盲人朋友，让他们像正常人一样享受互联网的便捷和乐趣，为他们提供一个更好的生活空间。

结　　论

在互联网时代，信息呈指数形式飞速增长。而由于视力受损，全世界众多的视障人群无法便捷地访问数字信息，特别是互联网上大量的图形图像信息。针对盲人用户对数字图形信息的认知和交互需求，本书探索了面向盲人触觉认知的触觉显示与及交互体验研究，并深入到触觉图形显示器的设计案例中。

本书从触觉特点开始，分析了触觉引入信息设计与交互设计的必要性。然后围绕着盲人用户，首先进行其生活状态和需求调研，结合盲人触觉辅助设备的综述，通过理论和用户实验等方法进行了盲人的触觉认知和交互的设计研究，给出了设计建议。其次，从用户体验的角度，探索了盲人的触觉交互体验，作为设计导向。再次，研究了面向盲人的触觉认知与交互体验设计理论与方法，通过设计原则、设计目标、设计要素和设计方法构建了设计方法论的理论架构。最后，进行了盲人触觉图形显示终端的设计实践，验证了触觉认知及交互体验设计的理论研究，并为盲人朋友提供了一个更便捷地访问互联网和图形图像学习的方式。

综上，本书主要的创新点为：

第一，进行了盲人的多角度触觉认知实验，并结合触觉的生理学和心理物理学特点，提出了触觉交互设计的基础和导向。

盲人的信息获取与交互离不开感官和认知的基础研究。本书针对触觉通道，首先研究触觉的生理、情感和心理的相关理论基础，再把上述理论与应用相结合，通过用户研究和实验分析，探索盲人触觉认知的特点和影响触觉认知的关键因素，并对触觉认知理解的触摸方式、触听觉多通道认知和引导认知做了定量实验研究，作为设计的基础和导向。

第二，提出了面向盲人的触觉交互体验的设计理论与方法，指导了盲人的触觉认知设计和触觉辅助设备的设计。

通过上述盲人的认知研究和触觉体验的特征、本质和影响因素的分析，本书从设计角度建立理论框架，探索盲人的触觉认知及交互体验的设计理论与方法，以符合盲人用户的具身认知、合理使用隐喻、动态示能与动态限

制的统一、成本控制为设计原则，以信息无障碍为设计目标，以信息时间和空间、产品功能与数字内容、信息架构与交互逻辑、产品造型和用户界面为设计要素，并将以盲人用户为中心、以自然交互为方式、以内容意义为根本、以信息转化为导向作为设计方法，完成了盲人触觉交互体验设计的方法论构建。

第三，设计并开发了面向盲人的相对低成本的触觉图形显示终端，能够让盲人学习和理解图形图像信息，更方便地访问互联网。

最后基于上述研究成果，进行触觉图形显示器的设计实践与验证。该设备采用创新的结构设计，实现了良好的触觉认知体验和相对的成本控制。它不仅能够渲染丰富的触觉图像信息和布莱尔盲文，而且可以作为教育资源广泛应用于学校、公共场所及盲人家庭。

值得注意的是，盲人触觉交互所涉及的学科领域较多，同时信息科技和交互技术的发展速度很快，且客观条件和笔者的研究能力有限，关于盲人触觉认知与交互设计研究还处在初步探索实验阶段，盲人触觉图形显示器的设计实践更需要多轮次的设计和开发的迭代。本研究的不足之处主要包括：

第一，盲人群体在物理世界的认知和构建方面的研究还需要更深入的挖掘。这部分研究涉及深入的人因研究、认知心理学和社会学等学科，目前的研究程度比较有限。

第二，盲人触觉图形显示终端的设计实践中，设备的设计开发周期较长，目前只完成了核心的触觉图形渲染功能，设备还处在原型阶段，还需要多次的用户实验反馈和设计迭代，离正式的商用还有较大差距。这也是课题组在未来的重点工作。

参考文献

【以下文献均为书中引用文献，未引用的文献不在其列。】

中文文献

[1] 39健康网．盲人敏锐的触觉[OL]．http://eye.39.net/yb.

[2] 蔡勇超，马辉．论当代艺术馆与VR的联络[J].住宅与房地产，2016(12).

[3] 陈柏泉．从无障碍设计走向通用设计[D]．北京：中国建筑设计研究院，2004.

[4] 陈暑生，马国欣，等．一种盲人识字辅助装置的实现方法[J]．自动化与信息工程，2011.01：19-21.

[5] 陈为.用户体验设计要素及其在产品设计中的应用[J].包装工程，2011，32：26-30.

[6] 陈志刚，鲁晓波．大数据背景下信息与交互设计的变革和发展[J]．包装工程，2015，36(8)：6-9.

[7] 程黎，顾定倩，等．我国盲文使用状况的调查研究[J]．语言文字应用，2013(2)：42-48.

[8] 董建明，傅利民，饶培伦，等．人机交互——以用户为中心的设计和评估[M]．北京：清华大学出版社，2010.

[9] 方晓琴．初中记叙文写作的序列化训练研究[D]．成都：四川师范大学，2015.

[10] 费希纳.心理物理学纲要[M].李晶，译.北京：中国人民大学出版社，2015.

[11] 福州：卢浮宫触摸雕塑艺术特展 盲人可感受维纳斯的美[OL]．http://news.sina.com.cn/c/2009.11.21/061016644295s.shtml.

[12] 郭南初，熊志勇.产品形态仿生设计与逆向工程技术[J].包装工程，2006，27(10)：218-219.

[13] 郭文莎．IPMC的制备研究及其在触觉显示器中的应用[D]．武汉：华中科技大学，2011.

[14] 郝凝辉．实体交互界面TUI设计方法研究[D]．北京：清华大学，2014.

[15] 胡国兴，李清水，等．听觉界面与盲人用户手机界面[J]．人类工效学，2003，9(2)：7-10.

[16] 胡晓琛．中国语境下的交互设计研究[J]．科技传播，2014(2).

[17] 互联网博物馆．交互设计-科技中国[OL]．http://www.techcn.com.

[18] 黄澜．电刺激皮肤触觉型盲人视觉替代系统[J]．上海第二工业大学学报，1989(1)：37-43.

[19] 黄晟. 基于用户体验的 APP 设计研究[D]. 西安：陕西科技大学，2012.
[20] 加瑞特 J J. 用户体验要素：以用户为中心的产品设计[M]. 2 版. 范晓燕，译. 北京：机械工业出版社，2014：4-17.
[21] 江宁. 关于触觉交互的辅助设备研究——盲人触觉交互设备设计[D]. 北京：清华大学. 2011.
[22] 江宁. 面向盲人的图形显示设计方法及其用户体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2011，23(9)：1539-1544.
[23] 蒋小艳，胡作进. 基于电极刺激原理的盲文点显器的设计与实现[J]. 计算机应用，2014(34).
[24] 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉交互的演进及未来趋势分析[J]. 中国计算机学会通讯，2016，12(3)：50-54.
[25] 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图像显示器 Graille 设计研究[J]. 装饰，2016(273)：94-96.
[26] 焦阳，龚江涛，等. 盲人触觉图形显示器的交互体验研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2016，28(9)：1571-1576.
[27] 凯勒. 假如给我三天光明[M]. 李汉昭，译. 北京：华文出版社，2002.
[28] 莱文森. 软利器——信息革命的自然历史与未来[M]. 何道宽，译. 上海：复旦大学出版社，2011.
[29] 李恒威，盛晓明. 认知的具身化[J]. 科学学研究，2006(2).
[30] 李宏汀，陈柏鸿，等. 触觉交互研究的回顾与展望[J]. 人类工效学，2008，14(3)：51-53.
[31] 李浚. 从纸质触摸阅读到人机交互式阅读——盲人阅读方式发展趋势前瞻[J]. 四川图书馆学报，2012(185)：68-71.
[32] 梁晓. 盲文显示用压电执行器阵列的驱动系统研究[D]. 宁波：宁波大学，2012.
[33] 刘晓力. 交互隐喻与涉身哲学——认知科学新进路的哲学基础[J]. 哲学研究，2005(10).
[34] 刘毅. 工作室体系下的交互设计教学初探——以广美交互设计工作室为例[J]. 装饰，2013(239)：143-144.
[35] 刘月林. 信息艺术设计语言——动态交互形式研究[D]. 北京：清华大学，2011.
[36] 鲁利群，赵聪敏. 丰富环境与神经可塑性[J]. 中国临床康复，2005，9(16)：141-143.
[37] 鲁晓波. 清华大学美术学院教师个人介绍[OL]. http://www.tsinghua.edu.cn/publish/ad/5555/2010/20101216101702590910292/20101216101702590910292_.html.
[38] 路璐，田丰，戴国忠，等. 融合触、听、视觉的多通道认知和交互模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2014，26(4)：654-661.
[39] 麦肯锡. 2013 年中国电子零售业革命报告[OL]. http://www.199it.com/archives/116657.html.

[40] 穆怡雯. 多通道交互设计方法研究[D]. 北京：北京邮电大学，2008.
[41] 诺曼. 情感化设计[M]. 付秋芳，等译. 北京：电子工业出版社，2005.
[42] 潘永亮. 人机交互界面设计中的自然化趋势[J]. 装饰，2008(181)：130-131.
[43] 普瑞斯 J，罗杰斯 Y，夏普 H. 交互设计——超越人机交互[M]. 刘晓晖，等译. 北京：电子工业出版社，2003.
[44] 邱宏. 基于触觉显示技术的网络弹性材质界面研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
[45] 曲欣，钟经华，等. 盲文平面触觉凸图研究[J]. 科技信息，2010，21：700-701.
[46] 全球医院网. 是什么引起了视力残疾[OL]. http://bbs.qqyy.com.
[47] 孙皓琼. 图形对话：什么是信息设计[M]. 北京：清华大学出版社，2011.
[48] 覃京燕，计汇文. 基于 TUI 的产品自然交互界面设计方法研究[C]//Proceedings of HHME2009. 西安，2009：278-280.
[49] 覃京燕. 文化遗产保护中的信息可视化设计方法研究[D]. 北京：清华大学，2007.
[50] 覃京燕. 大数据时代的大交互设计[J]. 包装工程，2015，36(8)：1-5.
[51] 特里斯，阿伯特. 用户体验度量：收集、分析与呈现[M]. 2 版. 周荣刚，秦宪刚，译. 北京：电子工业出版社，2016.
[52] 滕伟民，李伟洪. 中国盲文[M]. 北京：华夏出版社，2014.
[53] 王明旨. 工业设计概论[M]. 北京：高等教育出版社，2007.
[54] 王欣. 信息无障碍领域技术与产业发展现状[J]. 信息技术与标准化，2011，4：18-22.
[55] 王新荣，王平基，孙伟. 中国人体体表面积计算图[J]. 白求恩军医学院学报，2011，1(9)：39-40.
[56] 王秀荣，许京荆，等. 压电驱动器激励的触觉显示器结构设计及有限元分析[J]. 现代机械，2008，6：24-27.
[57] 王寅. 认知语言学[M]. 上海：上海外语教育出版社，2007.
[58] 吴丹玥，干静. 辅助盲人访问 Internet 的力触觉交互技术[J]. 工程设计学报，2010，17(2)：128-133.
[59] 吴东梅. 无障碍设计原则中的人文主义精神[J]. 艺术百家，2007(98)：88-94.
[60] 吴涓，宋爱国，等. 一种基于图像处理的纹理力触觉建模和表达方法研究[J]. 测控技术，2008，27(4)：17-20.
[61] 吴涓，宋振中，等. 用于盲人的图像震动触觉显示系统设计[J]. 东南大学学报，2011，41(5)：973-977.
[62] 吴琼. 交互设计的域与界[J]. 装饰，2010(201)：34-37.
[63] 吴兆卿. 触觉交互——一种新兴的交互技术[J]. 人类工效学，2006，12(1)：57-59.
[64] 习近平致信祝贺中国残疾人福利基金会成立 30 周年[OL]. 新华网. http://news.xinhuanet.com/politics/2014-03/21/c_119889772.htm.

[65] 谢叻,张艳,等. 虚拟手术中的力学变形和力觉感知[J]. 医用生物力学,2006,21(3):241-245.
[66] 徐芳. 交互设计与政府网站信息服务优化研究[J]. 电子政务,2012(112):27-32.
[67] 徐明,汪伟. 视障大学生阅读盲文教材规律的研究[J]. 长春大学学报,2014,24(9):1276-1278.
[68] 亚里士多德. 亚里士多德全集[M]. 苗力田,主编. 北京:中国人民大学出版社,2016.
[69] 闫守轩. 体验与体验教学[J]. 教育科学,2004(12):32-33.
[70] 杨洁. 大数据时代的海洋科技[N]. 中国海洋报,2016-12-08.
[71] 姚彩,陈功,高西美. 基于视触觉的产品情感表达研究[J]. 美与时代,2011(01):82-83.
[72] 喻耀华,刘正捷. 触觉显示的人机交互研究及应用[J]. 计算机科学,2008,35(11):28-31.
[73] 张烈. 以虚拟体验为导向的信息设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2008.
[74] 张小瑞. 虚拟物体力/触觉交互算法的研究进展[J]. 系统仿真学报,2011,23(4):627-642.
[75] 张燕燕,李朝东,等. 触觉显示器及其震动激发方式[J]. 工业仪表与自动化装置,2008(2):82-85.
[76] 张竹茂. 基于手指的触觉替代视觉系统的研制[D]. 上海:上海交通大学,2009.
[77] 赵浩凯. 触觉启动——适用于盲人你的包装设计探究与思考[J]. 装饰,2012(232):96-97.
[78] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学(F辑:信息科学),2009,39(1):2-46.
[79] 赵宇,茅于杭. 盲人人机交互系统的特点和现状[J]. 计算机应用,2005,25(10):2224-2227.
[80] 中国残疾人联合会. 2010年末全国残疾人总数及各类、不同残疾等级人数[OL]. http://www.cdpf.org.cn/sjzx/cjrgk/201206/t20120626_387581.shtml.
[81] 中国政协新闻网.《视觉讲述手册》助推盲人观影[OL]. http://cppcc.people.com.cn/n/2013/0827/c34948.22701062.html.
[82] 中华人民共和国科学技术部. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)[OL]. http://www.most.gov.cn/kjgh/.
[83] 周琳. 论品牌视觉形象中的触觉情感化设计——以原研哉的设计为例[J]. 美与时代,2009.1:31-33.
[84] 朱小杰. 图形用户界面设计中隐喻的作用研究[J]. 装饰,2014,3:116-117.
[85] 庄穆. 体验的认识功能初探[J]. 福建学刊,1994(6):51-53.

外文文献

[86] Adam J. Sporka, Ben L. Carson, et al. Toward Accessible Technology for Music Composers and Producers with Motor Disabilities[C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2013.

[87] Alexander Russomanno，Sile O' Modhrain，et al. Refreshing Refreshable Braille Displays[J]. IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS. 2015,8(3)：287-297.

[88] Allport DA，Antonis B，Reynolds P. On the division of attention：a disproof of the single channel hypothesis [J]. The Quarterly journal of Experimental Psychology，1972，24(2)：225-235.

[89] B. Shackel. A note on panel layout for numbers of identical items[J]. Ergonomics，2(1959)：247-251.

[90] B. Shackel. Ergonomics for a computer[J]. Design，120(1959)：36-39.

[91] Barry Richardson，Mark Symmons，et al. The TDS：A New Device for Comparing Active and Passive-Guided Touch[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering，2000，8(3)：414-417.

[92] Billie Bentzen. Tangible graphic displays in the education of blind persons[M]// Tactual Perception：A Sourcebook. William Schiff，Emerson Foulke，eds.，Cambridge：Cambridge University Press，1982：387-404.

[93] Bolt RA. "Put-That-There"：Voice and Gesture at the Graphics Interface[M]. California：Life time learning press，1984.

[94] Boyarski D，Buchanan R. Computers and communication design：Exploring the rhetoric of HCI[J]. Interactions，1994,1：25-35.

[95] Braille Authority of North America：Guidelines and Standards for Tactile Graphics[M]. Baltimore：Braille Authority of North America，2010.

[96] Bruce Goldstein. Sensation and Perception[M]. Belmont：Wadsworth Publishing，2002：5-11.

[97] Christopher Power，André Pimenta Freire，et al. Guidelines are Only Half of the Story：Accessibility Problems Encountered by Blind Users on the Web[C]// Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Supporting Visually Impaired Users. 2012：433-442.

[98] Cooper A，Reimann R，Cronin D. About face 3：The essentials of interaction design[M]. Indianapolis：Wiley Publishing，2007.

[99] Da-jung Kim，Youn-kyung Lim. Handscope：Enabling Blind People to Experience Statistical Graphics on Websites through Haptics[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Tactile & Haptics. 2011：2039-2042.

[100] David McGookin，Euan Robertson，et al. Clutching at Straws：Using Tangible Interaction to Provide Non-Visual Access to Graphs[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Sound and Speech. 2010：1715-1724.

[101] Deborah Kent Stein. The Optacon：Past，Present，and Future[OL]. https://nfb.org/images/nfb/publications/bm/bm98/bm980506.htm.

[102] Denise Prescher，Gerhard Weber，et al. A Tactile Windowing System for Blind Users[C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2010：91-98.

[103] Dianne Pawluk，Nikolaos Bourbakis，et al. Haptic Assistive Technology for Individuals who are Visually Impaired[J]. IEEE Transactions on Haptics. 2015,8(3)：245-247.

[104] Dianne Pawluk，Richard Adams，et al. Designing Haptic Assistive Technology for Individuals Who Are Blind or Visually Impaired[J]. IEEE Transactions on Haptics. 2015,8(3)：258-278.

[105] Dolan Brian. Timeline of Apple "iPhone" Rumors (1999-Present) [OL]. Retrieved February 17，2008.

[106] Dominique Archambault，Damien Olivier. How to make games for visually impaired children [C]//ACE'05 Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology. 2005：450-453.

[107] Edward Berlá. Haptic perception of tangible graphic displays [M]//Tactual Perception：A Sourcebook. William Schiff，Emerson Foulke，eds.，Cambridge：Cambridge University Press，1982：364-386.

[108] Edward Berlá. Strategies in scanning a tactual pseudomap[J]. Education of the visually handicapped,1973，5：8-19.

[109] Edward Berlá，Marvin Murr. Searching tactual space[J]. Education of the visually handicapped,1974,6：49-58.

[110] Edward Berlá，L. H. Butterfield，M. J. Murr. Tactual reading of political maps by blind students：A videomatic behavioral analysis[J]. Journal of Special Education.

[111] Erin Brady，Meredith Ringel Morris，et al. Visual Challenges in the Everyday Lives of Blind People[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Design for the Blind. 2013：2117-2126.

[112] F Kammermeier P，Schmidt G. Application-specific evaluation of tactile array displays for the human fingertip[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Los Alamitos：IEEE Computer Society Press. 2002，3：2937-2942.

[113] Fechner GT. Elemente der Psychophysik [M]. II，Leipzig：Breitkopf & Hartel，1860.

[114] Fechner GT. Revision der Hauptpunkte der Psychophysik [M]. Leipzig：Breitkopf & Hartel，1882：262.

[115] Fernando Vidal-Verdú，Moustapha Hafez. Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering，2007,15(1)：119-139.

[116] H. Rex Hartson. Cognitive，Physical，Sensory，and Functional Affordances in Interaction Design[M]. 2012.

[117] Handy Tech：HandyTech GWP[OL]. http://www.handytech.de.

[118] Hao Xu. A Support System for Graphics for Visually Impaired People[D]. London：The University of Western Ontario，2013.

[119] Hasser C J. HAPTAC：a haptic tactile display for the presentation of two-dimensional virtual or remote environments[M]. Wright-Patterson AFB：Wright-Patterson AFB Press，1995.

[120] Intel Edison Kit for Arduino Hardware Guide[M/OL]. https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/edison/sb/edison-arduino-hardware-guide.pdf.

[121] Ishii Hiroshi，Ullmer Brygg. Tangible Bits：Towards Seamless Interfaces between People，Bits and Atoms[C]//Proceedings of the ACM CHI 97 Human Factors in Computing Systems Conference，Atlanta，Georgia，1997：234-241.

[122] Ishii H，Lakatos D，Bonanni L，et al. Radical atoms：beyond tangible bits，toward transformable materials[J]. Interactions，2012，19(1)：38-51.

[123] Jakob Nielsen. Usability inspection methods[C]//Proceedings of CHI '94 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems. 1994：413-414.

[124] Jaime López-Krahe. Information Technologies for Visually Impaired People[R]. Information technologies for visually impaired people，2007,8(2)：5-9.

[125] James Bliss，Michael Katcher，Charles Rogers，et al. Optical-to-tactile image conversation for the blind[J]. IEEE Transactions on Man-Machine System，1970,11(1)：58-65.

[126] Jonathan Cole，Ian Waterman. Pride and a Daily Marathon[M]. Cambridge：the MIT Press，1995.

[127] Jonathan Lazar，Jinjuan Heidi Feng，et al. The SoundsRight CAPTCHA：An Improved Approach to Audio Human Interaction Proofs for Blind Users[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Redesigning I/O for Effectiveness. 2012：2267-2276.

[128] Junpei Watanabe，Hiroaki Ishikawa，et al. Surface Texture and Pseudo Tactile Sensation Displayed by a MEMS-Based Tactile Display[C]//Proceedings of IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and System. 2012：4150-4155.

[129] Justin M. Owen，Julie A. Petro，et al. An Improved，Low-cost Tactile "Mouse" for Use by Individuals Who are Blind and Visually Impaired[C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2009：223-224.

[130] Ken Nakagaki，Sean Follmer，et al. LineFORM：Actuated Curve Interfaces for Display，Interaction，and Constraint[C]//Proceedings of UIST 2015，ACM (2015).

[131] KJ Kokjer. The information capacity of the human fingertip[J]. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 1987,17: 100-102.

[132] Linvill J G, Bliss J C. A direct translation reading aid for the blind[J]// Proceedings of the IEEE. IEEE Press. 1966, 54(1): 40-51.

[133] Lynette A Jones, Hsin-Ni Ho. Warm or Cool, Large or Small? The Challenge of Thermal Displays[J]//Proceedings of the IEEE Transactions on Haptics. IEEE Press. 2008,1(1): 53-70.

[134] Lynette A Jones, Susan J Lederman. Human Hand Function[M]. Oxford: Oxford University Press, 2006.

[135] Mark A Symmons, Barry L Richardson, et al. Active vs passive touch: the state of play & the future[J]//Proceedings of Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2007.

[136] Maslow. A theory of human motivation[J]. Psychological Review, 1943: 370-396.

[137] Mayer R E, Moreno R. A split attention effect in multimedia learning: evidence for dual processing systems in working memory[J]. Journal of Educational Psychology, 1998, 90(2): 312-320.

[138] Metec-AG. Hyperbraille graphic display 7200[OL]. http://web. metec-ag. de/graphic%20display. html.

[139] Metec-AG. Hyperbraille Display 7200 user's manual[M]. Stuttgart: METEC AG, 2014.

[140] Ming Lin, Miguel Otaduy. Haptic Rendering Foundations, Algorithms, and Applications[M]. Wellesley: A K Peters/CRC Press, 2008: 21-50.

[141] Moreno R, Mayer R E. Cognitive principles of multimedia learning: the role of modality and contiguity[J]. Journal of Educational Psychology, 1999, 91(2): 358-368.

[142] N. H. Runyan. EAP Braille Display Needs and Requirements[OL]. National Braille Press, 2009. http://www. nbp. org/downloads/EAPBrailleDisplayNeedsandRequirements. doc.

[143] NIST& NFB[OL]. http://www. nist. gov/public_affairs/factsheet/visualdisplay. htm National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD.

[144] Nithin Santhanam, Shari Trewin, et al. Self-Selection of Accessibility Options [C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2011: 277-278.

[145] Nithin Santhanam. Wii Remote as a Web Navigation Device For People with Cerebral Palsy[C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2012: 303-304.

[146] Norman D A. Emotional design: Why we love (or hate) everyday things[M]. New York: Basic Books, 2004.

[147] Orit Shaer, Eva Hornecker. Tangible User Interfaces: Past, Present and Future Directions[J]. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, 2009, 3: 1-137.

[148] Patrick Armstrong, Brett Wilkinson. Text entry of physical and virtual keyboards on tablets and the user perception[C]//Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction OzCHI. 2016: 401-405.

[149] Patrick C Headley, Dianne T V. A Low-Cost, Variable-Amplitude Haptic Distributed Display for Persons who are Blind and Visually Impaired[C]//Proceedings of the ACM ASSETS. 2010: 227-228.

[150] Paul Bach-y-Rita, Carter Collins, Frank Saunders, et al. Vision substitution by tactile image projection[J]. Nature, 1969, 08: 963-964.

[151] Paul Bach-y-Rita, Kurt Kaczmarek, Mitchell Tyler, et al. Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tougue: A technical note[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 1998, 35: 427-430.

[152] Paul Bach-y-Rita, Carter Collins. Sensory substitution system using the skin for the input to the brain[J]. Journal of the audio Engineering society, 1971, 19(5): 427-429.

[153] Polly Edman. Tactile graphics[M]. New York: AFB Press, 1994: 3-102.

[154] Qiuyu Lu, Chengpeng Mao, et al. LIME: LIquid MEtal Interfaces for Non-Rigid Interaction[C]//Proceedings of UIST 2016, ACM (2016).

[155] Rob Gray, Charles Spence, et al. Efficient Multimodal Cuing of Spatial Attention[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press, 2013, 101(9): 2113-2122.

[156] Robert D. Howe, Dimitrios A. Kontarinis, et al. Shape Memory Alloy Actuator Controller Design for Tactile Displays[C]//Proceddings of the 34th Conference on Decision & Control, IEEE. 1995.12: 3540-3544.

[157] Sabrina A. Paneels, Adriana Olmos, et al. Listen to It Yourself! Evaluating Usability of "What's Around Me?" for the Blind[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Design for the Blind. 2013: 2107-2116.

[158] Schuffelen M. On editing graphics for the blind[M]. The Hague: Netherlands Library for Audio Books and Braille Press, 2002.

[159] Schweikhardt W, et al. Rechnerunterstützte aufbereitung vonbildshirmtext-grafiken in eine tastbare darstellung[D]. Stuttgart: Stuttgart University Press, 1984.

[160] Sean Follmer, Daniel Leithinger, et al. inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation[C]//Proceedings of UIST 2013, ACM (2013).

[161] Seungmoon Choi, Katherine J. Kuchenbecker. Vibrotactile Display: Perception,

Technology, and Applications[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press, 2013,101(9): 2093-2104.

[162] Shaun K Kane, Jacob O Wobbrock, et al. Usable Gestures for Blind People: Understanding Preference and Performance[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Gestures. 2011: 413-422.

[163] Shaun K Kane, Brian Frey, et al. Access Lens: A Gesture-Based Screen Reader for Real-World Documents[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Technologies for Life 1. 2013: 347-350.

[164] Shimojo M, Shinohara M, Tanii M, et al. An approach for direct manipulation by tactile modality for blind computer users: Principle and practice of detecting information generated by touch action[M]//Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2004, 3116: 753-760.

[165] Shiri Azenkot, Sanjana Prasain, et al. Enhancing Independence and Safety for Blind and Deaf-Blind Public Transit Riders[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Tactile Interaction. 2011: 3247-3256.

[166] Sile O' Modhrain, Nicholas A. Giudice, et al. Designing Media for Visually-Impaired Users of Refreshable Touch Displays: Possibilities and Pitfalls[J]. IEEE Transactions on Haptics. 2015,8(3): 248-257.

[167] Steven Wall, Stephen Brewster. Sensory substitution using tactile pin arrays: Human factors, technology and applications[J]. Signal Processing, 2006, 86(12): 3674-3695.

[168] Susan J Lederman, Lynette A Jones. Tactile and Haptic Illusions[J]//Proceedings of the IEEE Transactions on Haptics. IEEE Press. 2011, 4(4): 273-294.

[169] Susumu Harada, Daisuke Sato, et al. Accessible Photo Album: Enhancing the Photo Sharing Experience for People with Visual Impairment[C]//Proceedings of the ACM SIGCHI International Conference on Design for the Blind. 2013: 2127-2136.

[170] Tactisplay Corp, tactisplay walk[OL]. http://www.tactisplay.com/product/tactisplay.

[171] Tactisplay Corp, tactisplay table[OL]. http://www.tactisplay.com/product/tactisplay-table.

[172] Thomas P Way, Kenneth E, et al. Automatic Visual to Tactile Translation—Part Ⅰ: Human Factors, Access Methods, and Image Manipulation[J]//Proceedings of the IEEE. IEEE Press, 1997,5(1): 81-94.

[173] Thorsten Völkel, Gerhard Weber, Ulrich Baumann. Tactile Graphics Revised: The Novel BrailleDis 9000 Pin-Matrix Device with Multitouch Input[J]//Computers Helping People with Special Needs-Lecture Notes. Computer Science, 2008, 5105: 835-842.

[174] TIM ABTIM[OL]. http://www.abtim.com ABTIM.

[175] U. S. Department of Labor. Presenting Effective Presentations with Visual Aids [R]. OSHA Office of Training and Education, 1996.

[176] Victor Kaptelinin, Bonnie Nardi. Affordances in HCI: Toward a Mediated Action Perspective[C]//Proceedings of CHI 2012.

[177] William Schiff, Lane Kaufer, Sandra Mosak. Informative tactile stimuli in the perception of direction [J]. American Foundation for the Blind, Research Bulletin, 1967, 14: 65-94.

[178] World Health Organization. Global Data on Visual Impairments 2010[M]. 2012.

[179] Wouter M. Bergmann Tiest, Astrid M. L. Kappers. Cues for Haptic Perception of Compliance[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2009, 2(4): 189-199.

[180] Xu Hao. A Support System For Graphics For Visually Impaired People[D]. London: The University of Western Ontario. 2013.

[181] Y. Borodin, F. Ahmed, et al. Hearsay: A New Generation Context-Driven Multi-Modal Assistive Web Browser[C]//Proceedings of the ACM WWW on Demo. 2010: 1233-1236.

[182] Yu W, Ramloll R, Brewster S A. Haptic Graphs for Blind Computer Users[J]. Computer Science, 2001(2058): 41-51.

[183] Yusaku Kato, Tsuyoshi Sekitani, et al. Sheet-Type Braille Displays by Integrating Organic Field-Effect Transistors and Polymeric Actuators[J]. IEEE Transactions On Electron Devices, 2007, 54(2): 202-209.

后　　记

本书是在导师徐迎庆教授的悉心指导下完成的。在博士四年求学生涯中，导师在学习、生活、工作等方面均给予了我非常多的帮助与支持，在我培养计划的制订、研究课题的落实、论文撰写等方面均给予了悉心的指导和关怀，使我从中受益匪浅。在此谨向我的导师徐迎庆教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！

同时感谢所有任课老师在这四年来给我的指导和帮助，包括鲁晓波老师、米海鹏老师、师丹青老师、史元春老师、洪波老师、张烈老师、张尕老师等清华大学优秀的老师们，在此向他们表示我由衷的谢意。

衷心感谢X工作室的所有同学们，学科交叉的研究氛围赐予了我更多的设计灵感和更综合的研究能力，本课题也是课题组成员共同的成果，感谢同学们！

本课题承蒙国家重点研发计划“大幅面高分辨触控设备”、国家自然科学基金重点项目“自然用户界面交互理论与方法”的课题支持，百度、英特尔、微软的资助和设备支持，以及联合国儿童基金会、北京市盲人学校、北京联合大学特殊教育学院、中国盲文出版社的重点关注和合作，特此致谢。

感谢我的父母，感谢你们最伟大的爱、最无私的支持。

感谢我的挚爱崔捷，没有什么可与你相比。

焦　阳

2017年6月